

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/329093168>

Основы речной гидрологии и гидробиологии/Basics of river hydrology and hydrobiology

Book · November 2017

CITATIONS

0

READS

3,291

2 authors:



V. V. Bogatov

Russian Academy of Sciences

102 PUBLICATIONS 526 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Alexander Sergeevich Fedorovskiy

Far Eastern Federal University

3 PUBLICATIONS 14 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

**ОСНОВЫ РЕЧНОЙ ГИДРОЛОГИИ
И ГИДРОБИОЛОГИИ**

**BASICS OF RIVER HYDROLOGY
AND HYDROBIOLOGY**

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Дальневосточное отделение
Федеральный научный центр
биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН

В.В. Богатов, А.С. Федоровский

ОСНОВЫ РЕЧНОЙ ГИДРОЛОГИИ И ГИДРОБИОЛОГИИ

Под редакцией проф. Е.А. Макаrenchенко



Владивосток
Дальнаука
2017

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
Far Eastern Branch
Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity

V.V. Bogatov, A.S. Fedorovskiy

BASICS OF RIVER HYDROLOGY AND HYDROBIOLOGY

Editor: Professor E.A. Makarchenko



Vladivostok
Dalnauka
2017

Богатов В.В., Федоровский А.С. Основы речной гидрологии и гидробиологии. – Владивосток: Дальнаука, 2017. – 384 с.

ISBN 978-5-8044-1651-6

В книге изложены основные положения речной гидрологии, адаптированные для водных экологов, кратко представлены компоненты речных экосистем. Рассмотрено применение современного гидрологического и гидробиологического оборудования и приемов обработки данных. На конкретных примерах показаны широкие возможности привлечения гидрологических показателей для исследования структурно-функциональных характеристик речных сообществ и активного дрейфа гидробионтов. Обозначены наиболее значимые характеристики речных экосистем как целостных природных комплексов. Предложена дренажно-транзитная концепция, определяющая функциональную значимость водосборных бассейнов при формировании речного континуума.

Книга рассчитана на гидрологов, гидробиологов, специалистов водного хозяйства и охраны природы, преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений.

Ил. 203, табл. 29, библи. 610.

Bogatov V.V., Fedorovskiy A.S. Basics of river hydrology and hydrobiology. – Vladivostok: Dalnauka, 2017. – 384 с.

This book offers the foundation of the river hydrology revised for aquatic ecologists, where the components of the river ecosystems are briefly described. The applications of modern hydrological and hydrobiological equipment and methods of data processing are considered. Specific examples show the wide possibilities of using hydrological parameters to study the structural-functional characteristics of river communities and their active drift. Demonstrated the most important characteristics of the river ecosystems as integrated natural systems. Proposed drainage-transit concept that determines the functional significance of the watersheds in the formation of the river continuum. The book is intended for hydrologists, hydrobiologists, specialists of water management and nature protection, teachers and graduate students of higher educational institutions.

Ill. 203, tabl. 29, bibl. 610.

Научный редактор: д.б.н., профессор *Е.А. Макаrenchенко*

Рецензенты: академик *А.В. Адрианов*,

член-корреспондент РАН *С.М. Голубков*

Издано по решению Ученого совета

ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН

Публикация осуществлена при финансовой поддержке Дальневосточного отделения РАН

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	9
1. РЕЧНАЯ ГИДРОЛОГИЯ	11
1.1. РЕКА И ЕЕ БАССЕЙН	12
1.1.1. Гидрографические характеристики и их определение	14
1.1.2. Вода в состоянии покоя и движения	22
1.1.3. Элементы речной гидравлики	58
1.1.4. Речные потоки и русла	70
1.1.5. Речные наносы	91
1.2. ИСТОЧНИКИ ДАННЫХ О РЕКАХ	108
1.2.1. Топографические карты	108
1.2.2. Аэрофотоснимки	115
1.2.3. Дистанционное зондирование Земли	119
1.2.4. Государственный водный кадастр	130
1.3. ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	138
1.3.1. Топографо-геодезические работы	140
1.3.2. Гидрометрические работы	147
1.3.3. Оценка стока переносимых водой веществ	170
1.4. СВЕДЕНИЯ О ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ	176
1.4.1. Годовой сток воды	177
1.4.2. Минимальный и максимальный сток	185
2. РЕЧНАЯ ГИДРОБИОЛОГИЯ	188
2.1. РЕЧНЫЕ ОРГАНИЗМЫ	190
2.1.1. Бактерии	192
2.1.2. Водные растения	195
2.1.3. Водные беспозвоночные	203
2.1.4. Рыбы	210
2.2. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ РЕЧНЫХ ЭКОСИСТЕМ	216
2.2.1. Количественный учет бентосных и планктонных организмов ...	217
2.2.2. Первичная продукция и автоматизированный химический анализ воды	223
2.2.3. Вторичная продукция	232
2.2.4. Методы изучения роста и возраста животных	235
2.2.5. Количественная оценка дрейфа речного бентоса	237
2.3. КРУГОВОРОТ ВЕЩЕСТВ И ТРОФИЧЕСКИЕ СВЯЗИ	244
2.3.1. Концепции спиралеобразного движения питательных веществ в реке	245
2.3.2. Аллохтонное органическое вещество	249
2.3.3. Трофические уровни и функциональные группы	254
2.3.4. Динамика трофических сетей	260

2.4. ДРИФТ РЕЧНОГО БЕНТОСА	268
2.4.1. Суточная периодичность дрейфа	269
2.4.2. Вертикальное распределение дрейфующих гидробионтов	273
2.4.3. Миграционная активность, дистанция и время дрейфа	279
2.4.4. Соотношение дрейфа и биомассы беспозвоночных	284
2.4.5. Соотношение дрейфа и продукции беспозвоночных	291
2.5. БАЗОВЫЕ И ЧАСТНЫЕ КОНЦЕПЦИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЕЧНЫХ ЭКОСИСТЕМ	295
2.5.1. Концепция речного континуума	295
2.5.2. Дисконтинуальные модели речных сообществ	298
2.5.3. Комбинированная концепция	301
2.5.4. Концепция синтеза речных и прибрежноречных экосистем	302
2.5.5. Вспомогательные концепции	305
2.5.6. Дренажно-транзитная концепция	306
2.5.7. Концепция градиента речного биома	311
2.5.8. Реобиом как открытая природная система	315
2.6. ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ РЕОБИОМОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕ- МАЛЬНЫХ ПРИРОДНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	323
2.6.1. Факторы устойчивости и выносливости реобиомов	327
2.6.2. Структура речных экосистем зоны муссонного климата	336
2.6.3. Речные экосистемы в условиях глобального изменения климата	345
Литература	354

CONTENTS

Preface.....	5
1. RIVER HYDROLOGY	11
1.1. River and its watershed	12
1.1.1. Determination of hydrographic characteristics	14
1.1.2. Water at rest and in motion	22
1.1.3. Elements of open-channel hydraulics	58
1.1.4. River flows and channels	70
1.1.5. River sediments	91
1.2. SOURCES OF RIVER DATA	108
1.2.1. Topographical maps.....	108
1.2.2. Aerial photographs	115
1.2.3. Remote sensing of the Earth	119
1.2.4. National water cadastre	130
1.3. FIELD INVESTIGATIONS	138
1.3.1. Surveying	140
1.3.2. Hydrological observations	147
1.3.3. Moving matter discharge estimation	170

1.4. STREAMFLOW FREQUENCY ANALYSIS.....	176
1.4.1. Year water discharge.....	177
1.4.2. Minimal and maximal discharges.....	185
2. RIVER HYDROBIOLOGY	188
2.1. RIVER ORGANISMS.....	190
2.1.1. Bacteria	192
2.1.2. Aquatic plants.....	195
2.1.3. Aquatic invertebrates.....	203
2.1.4. Fishes.....	210
2.2. METHODS OF RIVER ECOSYSTEM ASSESSMENT	216
2.2.1. Benthic and planktonic organisms accounting	217
2.2.2. Primary production and automated chemical analysis of water	223
2.2.3. Secondary production	232
2.2.4. Methods of study of growth and age of the animals.....	235
2.2.5. River benthic drift accounting	237
2.3. NUTRIENT CYCLE AND TROPHIC RELATIONS	244
2.3.1. The concept of a spiral movement of nutrients in the river	245
2.3.2. Allochthonous organic matter	249
2.3.3. Trophic levels and functional groups	254
2.3.4. Dynamics of trophic networks	260
2.4. RIVER BENTHOS DRIFT	268
2.4.1. Daily periodicity of the drift	269
2.4.2. Vertical distribution of drifting aquatic organisms	273
2.4.3. Migration activity, distance, and time of drift.....	279
2.4.4. Drift and biomass of invertebrates ratio.....	284
2.4.5. Drift and production of invertebrates ratio	291
2.5. BASIC AND PARTICULAR CASE CONCEPTS OF THE RIVER ECOSYSTEMS FUNCTIONING.....	295
2.5.1. The river continuum concept	295
2.5.2. Discontinuous models of river communities	298
2.5.3. Combined concept.....	301
2.5.4. Synthesis river and riverside ecosystems concept	302
2.5.5. Auxiliary concepts	305
2.5.6. Drainage-transit concept	306
2.5.7. Gradient of the river biome concept	311
2.5.8. Reobiome as an open natural system	315
2.6. FUNCTIONING OF REOBIOMES UNDER CONDITIONS OF EXTREME NATURAL IMPACTS.....	323
2.6.1. Sustainability of reobiomes factors.....	327
2.6.2. River ecosystems of the monsoon climate zone	336
2.6.3. River ecosystems in conditions of global climate change	345
Literature	354



ПРЕДИСЛОВИЕ

Задача настоящей книги – помочь речным гидробиологам и гидрологам найти общие точки соприкосновения и взаимодополнения при комплексном изучении рек. Если первую группу специалистов интересует состояние связанных с реками сообществ живых организмов, то вторую больше занимают вопросы формирования речного стока и водного баланса бассейнов, оценки физических характеристик рек в прошлом, настоящем и будущем, включая качество вод. Изучение гидробиологами основ гидрологии в географическом, геофизическом и инженерном аспектах этой науки позволяет глубже понять закономерности формирования структуры и функционирования речных биоценозов в продольном профиле реки и на этой основе более эффективно оценивать их состояние и динамику. В свою очередь учет гидрологами способности гидробионтов воздействовать на водный поток, например, путем формирования водорослево-бактериальных матов на грунте, склеивания валунов, гравия и галечника личинками ручейников при строительстве ловчих сетей, мощного обрастания твердого субстрата моллюсками, домиками ручейников и т.п. позволит уточнить гидравлические характеристики руслового потока, провести более достоверную оценку устойчивости русел и других характеристик рек в условиях влияния на речной сток естественных и антропогенных факторов.

Достижению поставленной задачи помогает структура монографии, состоящей из двух разделов. В первом разделе, подготовленном профессиональным гидрологом профессором А.С. Федоровским, изложены основные положения речной гидрологии, адаптированные для водных экологов, рассмотрены приемы описания гидрологических характеристик в связи с изучением гидробиологических условий рек, выделены этапы гидрологических работ, важнейшую часть которых составляют полевые экспериментальные исследования речного потока в его динамическом взаимодействии с русловыми отложениями. В этом же разделе рассмотрены приемы обработки гидрологических данных, в том числе с использованием геоинформационных технологий. Особое внимание обращено на изучение связи условий обитания водных организмов, структуры водного потока и гидравлических свойств русловых отложений.

Второй раздел книги, автор которого член-корреспондент РАН В.В. Богатов, связан с речной экологией, где кратко представлены основные компоненты речных экосистем и главные процессы жизнедеятельности гидробионтов. На конкретных примерах показаны широкие возможности привлечения гидрологических данных для исследования закономерностей формирования

структурно-функциональных характеристик речных сообществ и активного дрейфа бентосных организмов. Подробно освещены трофические связи в речной экосистеме и их сезонная динамика. Проведена систематизация имеющихся концептуальных представлений, позволяющая обозначить наиболее значимые характеристики речных экосистем как целостных природных комплексов, рассмотрены особенности функционирования реобиомов в условиях экстремальных природных воздействий. В заключительной части раздела предпринята попытка оценить возможную реакцию речной биоты на глобальное потепление климата и связанное с ним изменение природных циклов наводнений и засушливых сезонов.

Авторами книги на основе собственных наблюдений предложена дренажно-транзитная концепция, определяющая функциональную значимость водосборных бассейнов при формировании речного континуума. Читатель познакомится с современным гидрологическим и гидробиологическим оборудованием, а также с терминологией, принятой в гидрологии и гидробиологии, поскольку гидрологи и гидробиологи зачастую одними и теми же терминами обозначают разные объекты и явления. Значительная часть монографии посвящена практической реализации имеющихся методологических подходов к изучению рек как в отношении физических процессов, так и в отношении функционирования речных экосистем, причем часто в их взаимодействии. Этому же способствуют богатый иллюстрационный материал и обширный список литературы, в котором содержатся все необходимые для эффективной работы научно-методические руководства, основополагающие и самые современные отечественные и зарубежные публикации.

Авторы выражают искреннюю благодарность академику РАН А.Ф. Алимову (Россия), члену-корреспонденту РАН С.М. Голубкову (Россия), профессору Е.А. Макаренку (Россия), профессору Т.М. Тиуновой (Россия), профессору А.А. Протасову (Украина), профессору Р. Стивенсону (США), профессору К. Кушину (США), профессору Дж. Морзу (США) за ценные замечания, сделанные ими при прочтении рукописи или отдельных ее разделов.

Работа выполнена при поддержке программы ДВО РАН «Дальний Восток», грант 15-I-6-011 о.

1. РЕЧНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Речная гидрология – это раздел гидрологии суши, в котором изучают реки. В сферу интересов речной гидрологии входит оценка влияния на речной сток и качество вод климата, ландшафта, мелиорации земель, гидротехнических сооружений и других факторов. Изучается связь стока с осадками и испарением, особенности питания рек в различных физико-географических условиях, водный и тепловой баланс бассейнов, термический и гидрохимический режим рек, ледовые и другие явления и процессы. Как прикладная инженерная наука она занимается гидрологическими и водохозяйственными расчетами, предсказанием гидрологического режима рек – гидрологическими прогнозами для различных отраслей хозяйства.

Среди других объектов, которые изучаются гидрологией суши, следует также выделить озера и водохранилища, болота, ледники, почвенные и подземные воды. Направления гидрологических исследований этих объектов настолько важны, что прочно закрепились в виде самостоятельных разделов: гидрология озер, водохранилищ, болот, ледников, почвенных и подземных вод. Эти разделы входят в состав таких наук, как озероведение (лимнология), болотоведение, гляциология, почвоведение и гидрофизика почв, гидрогеология и др.

Гидрология прочно связана с другими науками, в особенности с гидравликой. Возникшая в глубине веков как наука о законах движения воды, имеющих исключительное значение для практической деятельности человека, она во многом сформировала гидрологию как самостоятельную науку. Большую роль в становлении гидрологии суши сыграла гидрография. По времени своего возникновения гидрография, занимающаяся сбором сведений, картированием и описанием водных объектов, опережает даже гидравлику. Нельзя не отметить топографию, использующую богатейший арсенал географических и геодезических методов и средств изучения форм земной поверхности, в том числе русловой сети и других элементов речных бассейнов.

В 1674 г. француз Пьер Перро (1608–1680 гг.) впервые доказал, что выпадающих атмосферных осадков вполне достаточно для поддержания стока р. Сена круглый год. Именно эта дата в 1974 г. официально признана ЮНЕСКО годом основания научной гидрологии.

Наибольшего расцвета научная гидрология получила только в XIX в., который дал миру целую плеяду выдающихся гидрологов и гидравликов.

Среди них Г. Прони, П. Жирар, И. Эйтельвен, А. Дарси, Н. Базен, А. Дюпюи, Г. Аббот, Р. Маннинг, Т. Мальвани, У. Смит, Г. Хаген, Ж. Пуазейль, Ж. Сен-Венан, А. Дарси и мн. др. Развитие теории гидрологической науки в это время сопровождалось появлением специальных служб наблюдений за режимом рек. В России до 1917 г. массовые наблюдения за уровнями, реке расходами воды велись Министерством путей сообщения. Так, по данным Спенглера [1975], число водомерных постов на водных путях возросло с 132 в 1876 г. до 554 в 1900 г. В 1919 г. руководство гидрологическими исследованиями, в том числе и организацией наблюдений, перешло к Государственному гидрологическому институту (ГГИ), в 1929 г. к Главному управлению гидрометеорологической службы СССР (ГУГМС), ныне Росгидромет. Значительный вклад в развитие научной гидрологии в России внесли В.Г. Глушков, А.И. Воейков, Д.И. Кочерин, М.А. Великанов, Б.В. Поляков, Е.В. Близняк, А.И. Чеботарев, Б.А. Апполов, Б.Д. Зайков, П.С. Кузин, Д.Л. Соколовский, Г.П. Калинин, А.Н. Бефани, М.И. Львович, И.Н. Гарцман, А.В. Караушев, Н.И. Коронкевич, И.А. Шикломанов и мн. др.

1.1. РЕКА И ЕЕ БАССЕЙН

Рекой называют естественный открытый поток воды, текущий с возвышенностей в пониженные участки рельефа. На земной поверхности вода находится под действием силы тяжести, которую можно разложить на две составляющие: одну, направленную под прямым углом ко дну реки, другую – вдоль течения потока. Последняя составляющая и движет воду. Ей сопротивляется сила трения частиц воды о русло и (в соответствии с теоретическими представлениями) между отдельными струйками, вследствие чего не получается бесконечно большого и непрерывного ускорения движения.

Часть земной поверхности, по которой течет река, называется *руслом*. Отметим, что руслом называется не только *ложе*, по которому непосредственно течет вода в данный момент, но и пространство, по которому она может течь при более высоких уровнях, например во время наводнений. Древние русла образовывались в результате горизонтальных и вертикальных движений земной коры, которые создавали на поверхности Земли множество складок. Пониженные части этих складок заполнялись водой. Стекая по уклону, вода разрушала и размывала слагавшие ложе горные породы на участках, где текла быстрее, и откладывала продукты разрушения горных пород (наносы) там, где скорость течения уменьшалась. Реки часто вначале стекали во внутренние материковые озера, а с течением времени вода находила себе путь из этих озер в другие пониженные местности, пока не доходила до бессточных водных объектов – крупных озер, океанов или морей.

Прилегающее к руслу пространство, затопляемое в половодье и паводки, называют *поймой*. В геологическом масштабе времени из-за постепенного

опускания русла вследствие эрозии ложа могут образовываться надпойменные террасы различной высоты, которые затапливаются только во время редких катастрофических наводнений. Вся суша покрыта протяженными, узкими, часто извилистыми углублениями, по которым текут реки (иногда только во время сильных дождей). Эти формы рельефа называются *речными долинами*. Между смежными долинами рек в горных районах находятся скальные образования или разнообразные плоскогорья; для равнинных районов характерны холмистые, часто заболоченные междуречья. Относительно узкая полоса местности между соседними долинами называется *водоразделом*. От водораздела к рекам направлены склоны соседних долин. Линия, идущая по направлению течения реки и соединяющая низшие точки поперечных сечений, называется *тальвегом*.

Все реки принято подразделять на главные реки и второстепенные – притоки, которые в них впадают. Притоки, впадающие в главную реку справа по течению, называются правыми притоками, слева – левыми. Поверхность земли, с которой вода стекает в данную реку либо непосредственно, либо через притоки, называется ее бассейном. Поскольку питание рек может быть поверхностным и подземным, различают поверхностный и подземный водосборы.

По данным РосНИИВХа [Михайлов и др., 2007], на территории Российской Федерации более 2,5 млн рек. Из них почти 95 % имеют длину менее 25 км. Их часто называют малые реки. Вниз по течению река принимает все больше и больше малых рек, и постепенно растут ее суммарный бассейн и водность. Бассейн большой реки, таким образом, не представляет собой самостоятельное образование, а является исключительно объединением бассейнов малых рек [Федоровский, 1985]. Совокупность реки со всеми ее притоками называют речной системой.

Реки вместе с прилегающими к ним бассейнами принято систематизировать, например, по условиям формирования стока, размеру бассейнов, видам питания, водному режиму рек и другим признакам в зависимости от цели исследования. По условиям формирования стока и типам русловых процессов реки, а также их бассейны подразделяют на горные, полугорные и равнинные.

К *горным* относят реки, протекающие среди горных хребтов, с высокими скоростями течения воды. Примером таких рек служат верховья рек бассейна Амура: Уссури, Зея, Буряя и др. К *полугорным* относят реки, берущие свое начало в невысоких горах и имеющие большие скорости течения воды, чем равнинные реки. К *равнинным* относят реки, формирующиеся в пределах невысоких возвышенностей и равнин и имеющие спокойный характер течения. Примером равнинных рек служит р. Волга, берущая свое начало на Валдайской возвышенности. Часто речной бассейн состоит из частей, имеющих различные условия формирования стока: в верховьях реки горные, в среднем и нижнем течении реки приобретают вначале полугорный, а затем и равнинный характер.

1.1.1. Гидрографические характеристики и их определение

Гидрографические характеристики рек могут быть определены по топографическим (на бумажной основе) или электронным картам на ПК. Большинство достоверных данных по гидрографическим характеристикам имеется в официальных гидрологических справочниках «Ресурсы поверхностных вод», «Основные гидрологические характеристики», «Гидрологическая изученность» и др. Много информации о реках содержится в ресурсах сети Интернет.

Длина реки измеряется на бумажной топографической карте речной сети масштаба 1 : 100 000 и крупнее *циркулем-измерителем*, имеющим на «ножках» иглы. Циркулем «шагают» с раствором 1 или 2 мм в зависимости от масштаба карты от устья до истока, а затем в обратном направлении с записью числа отложений раствора циркуля. Расхождение числа отложений не должно превышать 2 %. За окончательную величину принимают среднее число отложений. Длина реки определяется по формуле: $L = MKa$, где L – длина реки, км; M – среднее количество отложений; K – поправочный коэффициент на извилистость; a – длина «шага» циркуля в масштабе карты [Клибашев, Горошков, 1970].

Площадь водосбора определяется в следующем порядке. Вначале на топографической карте по наиболее высоким точкам рельефа (по водоразделу) проводят контуры бассейна. Для измерения площадей водосборов более 500 км² рекомендуются карты среднего масштаба (1 : 200 000 и 1 : 300 000) с горизонталями через 20 м. Для меньших по площади бассейнов применяют топографические карты крупного масштаба (1 : 25 000 и 1 : 100 000).

Измерение площадей производится специальным геодезическим прибором – планиметром или палеткой. Применяют механические или электронные полярные планиметры (рис. 1.1, а, б). Механический планиметр состоит из двух рычагов – полюсного 1 и обводного 4, соединяемых шарниром 8. Игла полюса 2 втыкается в бумагу. На конце длинного плеча обводного рычага укреплен шпиль 3 с ручкой (в некоторых моделях, как, например, в электронном планиметре, имеется увеличивающая линза с маркой в виде креста), который служит для проводки по контуру измеряемой площади. На конце обводного рычага крепится каретка с мерным колесом 6, опирающимся на поверхность бумаги, и элементами счетного механизма 5, 7. Суммарное число оборотов колеса, накопленное при обводке шпилем замкнутого контура, пропорционально ограниченной им площади.

Счетный узел (рис. 1.1, в) состоит из трех частей: циферблата 9, счетного колеса 10 и верньера 11. Удерживая обводной рычаг 4 за ручку шпиля 3, обводят контур измеряемой площади бассейна, при этом вся конструкция опирается на 3 точки: полюс 2, счетное колесо 10 и опорное колесо 14 (рис. 1.1, в).

Отсчет содержит четыре цифры. Первая ближайшая к металлическому указателю младшая цифра «берется» со счетчика числа оборотов 9 – это тысячи

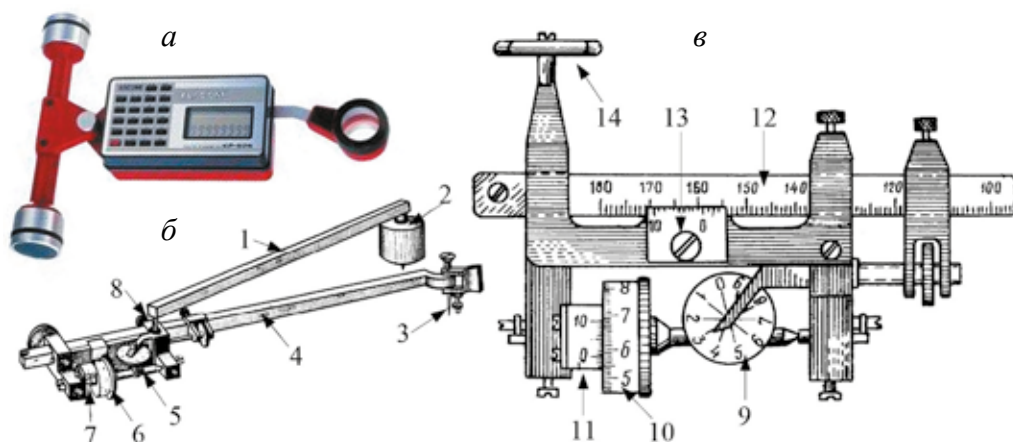


Рис. 1.1. Планиметры полярные: электронный (а), механический (б) и его отсчетный узел (в)

(от 1 до 9), две последующие – сотни и десятки (от 01, 02 и т.д. до 99) – со счетного колеса 10 до нуля верньера, четвертая цифра – единицы (от 0 до 9) – «снимается» по верньеру 11 путем определения штриха (от 0 до 10), совпадающего с одним из 10 штрихов счетного колеса 10. На рис. 1.1, в установлен отсчет по циферблату – цифра 3, по счетному колесу до нуля верньера – 58, по верньеру – 2. Полный отсчет выражается четырехзначным числом (3582).

Обводку производят плавно без толчков и остановок (вначале следует сделать пробную обводку без отсчетов, чтобы найти нужное положение прибора и оператора). При обводке угол между рычагами планиметра должен составлять от 30° до 150° и счетное колесо не должно сходиться с бумаги. В начале контура точку для установки шпильки выбирают так, чтобы счетное колесо вращалось медленно. Угол между рычагами при этом должен приближаться к 90° . Перед работами, если это не сделано ранее, производится определение цены наименьшего деления C планиметра по формуле $C = F/\Delta N_{\text{ср}}$, где F – заранее известная площадь, а $\Delta N_{\text{ср}}$ по отсчетам N_1 , N_2 и N_3 определяется так: $((N_2 - N_1) + (N_3 - N_2))_{\text{плл}} + ((N_2 - N_1) + (N_3 - N_2))_{\text{ппл}}/4$.

В качестве площади F часто рекомендуется обводить квадратную ячейку сетки на карте в см^2 или на миллиметровой бумаге в см^2 (в комплекте планиметра имеется специальная планка для обводки стандартной окружности). В первом случае при работе с планиметром получают площадь в см^2 , во втором – в см^2 , которые затем следует пересчитать в масштаб карты в км^2 . Так, если площадь квадрата $10 \times 10 \text{ см}$, измеренная планиметром 100 см^2 , то в масштабе карты $1 : 200\,000$ ($1 \text{ см} = 2 \text{ км}$) это будет $10 \text{ см} \times 2 \text{ км} \times 10 \text{ см} \times 2 \text{ км} = 400 \text{ км}^2$.

Измерение производится при двух положениях планиметра: счетный механизм вправо (ПП) и влево (ПЛ) от полюса по 2 раза. Из 4 измерений площади

контура вычисляют среднее значение $\Delta N_{\text{ср}}$, округлив до 4 значащих цифр. Затем $\Delta N_{\text{ср}}$ и F подставляют в формулу и рассчитывают цену деления планиметра C , которая может использоваться длительно, если не меняется положение каретки на рычаге и бумага карт одного сорта. Порядок определения площадей бассейнов на карте тот же, что и при определении цены деления планиметра, только при одном положении полюса: ПП или ПЛ. Расчет выполняется по формуле $F = C \times (N_2 - N_1)$, где N_1 и N_2 – отсчеты по счетному механизму в начале и в конце обвода фигуры. Рекомендуется измерять большие участки, имеющие площадь не менее 20 см^2 на карте. Точность механического способа характеризуется относительной погрешностью порядка $1/200$ – $1/300$. Более подробные инструкции по эксплуатации планиметров имеются в книге [Клибашев, Горошков, 1970] и в пособиях по геодезической практике.

Измерение площади бассейна до 100 км^2 можно выполнить с помощью *палетки*, которая представляет собой фабрично изготовленную пластмассовую прозрачную пластинку обычно $10 \times 10 \text{ см}$ с выгравированной сеткой квадратов $0,2 \times 0,2 \text{ см}$. Палетку накладывают на контур водосбора на карте и подсчитывают число полных больших ($1 \times 1 \text{ см}$) клеток, к ним прибавляют число полных малых клеток ($0,2 \times 0,2 \text{ см}$), а также их части, дополняя до целых малых клеток. Малые клетки переводят в целые и доли больших клеток из расчета: 1 большая клетка равна 25 малым клеткам. Площадь водосбора оценивается исходя из масштаба карты. Так, для карты масштаба $1 : 100\,000$ ($1 \text{ см} = 1 \text{ км}$) площадь большой клетки ($1 \times 1 \text{ см}$) равна 1 км^2 .

Средняя высота бассейна над уровнем моря ($H_{\text{ср}}$, м абс.) вычисляется методом среднего взвешенного с учетом доли площади, занятой данными высотами, по формуле $H_{\text{ср}} = (f_1 H_1 + f_2 H_2 + \dots + f_n H_n) / F$, где $f_1, f_2, \dots, f_n$ – площади со средними высотами $H_1, H_2, \dots, H_n$ между смежными горизонталями. Пример карты с горизонталями для расчета параметров уравнения по бассейну р. Каменка приведен на рис. 1.2. Средняя высота бассейна р. Каменка при площади $F = 275 \text{ км}^2$ будет составлять 177 м .

Средний уклон бассейна или русла реки представляет собой наклон русла или поверхности бассейна к линии горизонта и выражается в угловых градусах, долях единицы, в процентах (%) или в промилле (‰) – одной тысячной части единицы измерения (уклон 1 ‰ равен изменению высоты на 1 м на участке длиной 1 км). Расчет среднего уклона бассейна выполняется по формуле $I_{\text{бас}} = h((l_0 + l_n)/2 + l_1 + l_2 + \dots + l_{n-1}) / F$, где h – сечение рельефа на карте (превышение между горизонталями), м; $l_0, l_1, \dots, l_n$ – длины горизонталей в пределах бассейна, км; F – площадь бассейна, км^2 . Средний уклон русла – $I_{\text{рус}} = \Delta H / L$, где ΔH – разность отметок уровней воды в истоке и устье реки, м; L – длина реки, км. На реках со значительными изменениями уклона в гидрологических расчетах рекомендуется использовать средневзвешенный уклон русла [Пособие..., 1984].

Густота речной сети – одна из важнейших гидрографических характеристик, определяющих способность речного бассейна трансформировать атмосферные осадки в речной сток. Речную сеть можно представить как систему созданных на земной поверхности природными процессами больших и малых каналов, которая отводит избыток воды с территории. От плотности расположения «каналов» на единице площади, при прочих равных условиях, зависит, в конечном счете, скорость и степень дренирования (осушения) территории. Водосборы с высокими дренажными способностями обладают глубоко расчлененным рельефом с крутыми склонами и густой речной сетью, главным образом рек I и II порядков. Наоборот, водосборы с низкими дренажными способностями отличаются менее глубоко расчлененным рельефом с пологими склонами, и число рек на единицу площади на таких водосборах, как правило, невелико.

Густота речной сети γ_F рассчитывается делением общей длины рек бассейна $\sum L$ на площадь водосбора F : $\gamma_F = \sum L / F$. Она зависит от факторов, которые не одинаковы в разных ландшафтах. Однако во всех случаях основную роль в формировании речной сети играет прочность слагающих водосбор отложений, почвенный и растительный покров. Важное место в образовании и развитии речной сети занимает климат, определяющий важнейшие агенты эрозии земной поверхности: воду и солнечную радиацию, температуру и влажность воздуха, ветер (главным образом их экстремальные значения). Нельзя забывать о биологическом и химическом выветривании. Так, густота речной сети высока в полупустынных районах, где поверхностный сток от интенсивных ливней эродировывает слабо покрытые растительностью склоны [Knighton, 1984]. Высокими значениями этого показателя характеризуются горные ландшафты, в особенности в среднем поясе гор. Более низкая густота речной сети – на равнинных заболоченных территориях лесотундровой зоны. Как было отмечено

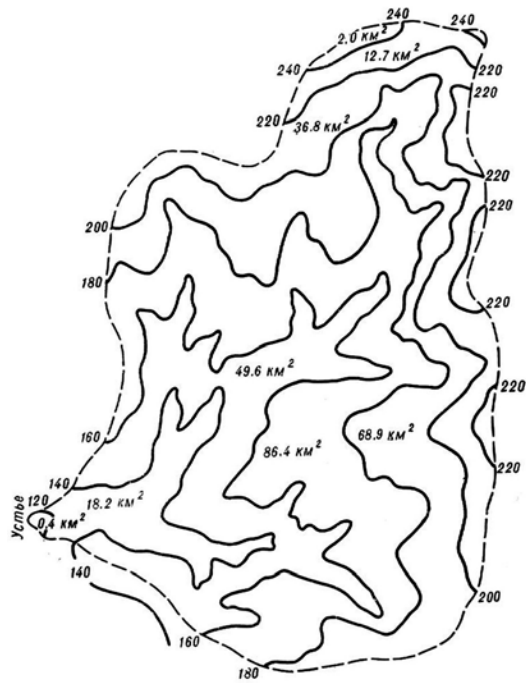


Рис. 1.2. Фрагмент карты с водосбором р. Каменка. Сплошными линиями обозначено положение на карте равных высот – горизонталей (с отметками в целых м). Площади между горизонталями f_n обозначены с точностью до десятых км². Пунктиром выделена водораздельная линия. Из: [Клибашев, Горошков, 1970]

выше, дренирующая способность бассейнов рек, а следовательно, и речной сток тесно связаны с густотой речной сети только при соответствующей увлажненности территории. Так, густая эрозионная сеть в полупустынных районах чаще всего сухая и дренирует территорию в редкие сильные ливни. Между тем сама увлажненность территории не всегда является ведущим фактором, определяющим густоту речной сети. Так, обнаруженная Воскресенским [1962] широтная зональность распределения среднего многолетнего речного стока для Европейской территории России не наблюдается в распределении густоты речной сети [Нежиховский, 1971].

В гидролого-геоморфологической литературе прочно укрепился термин *структура* речной сети. Для характеристики структуры речной системы используется понятие *порядок* реки. Назначение соответствующего порядка элементам речной системы является одним из методов классификации рек. Кроме того, порядок реки имеет связь с морфометрическими характеристиками реки, расходом воды и другими важными для практики параметрами [Strahler, 1952; Гарцман, 1968, 1973]. В большинстве методов назначения порядков рекам наименьшие притоки относятся к рекам I порядка [Хортон, 1948]. Бассейны тоже могут быть классифицированы порядком, например, площадь, дренирующая реку I порядка, может быть названа бассейном I порядка. На рис. 1.3 показаны четыре системы назначения порядков рек.

В классификации Хортона (рис. 1.3, *а*) два основных правила назначения порядков: первое – общее для всех, второе – существенно отличает систему Хортона от других более поздних классификаций.

Первое правило. Самые малые реки, не имеющие притоков, относятся к рекам I порядка. Река, образованная слиянием двух рек I порядка, относится к рекам II порядка. Ниже по течению она, как правило, принимает другие реки I порядка, что увеличивает ее сток, но порядок по Хортому не меняется. Только в том случае, когда сольются две реки II порядка, образуется элемент речной системы III порядка, который уже может принимать реки I, II порядков без изменения своего статуса. И лишь ниже точки слияния с рекой III порядка река приобретает статус IV порядка и т.д.

Второе правило. В речной сети выделяется главная река. Главная река имеет наивысший порядок K самого нижнего элемента речной сети, который присваивается всем наиболее длинным рекам предыдущих порядков: $K-1$, $K-2$, ... $K-i$, где i изменяется от 1 до $K-1$; если две реки порядка $K-1$ одинаковы, выбирается правый приток (рис. 1.3, *а*).

Этот постулат Хортона ведет к тому, что в нашем примере (рис. 1.3, *а*) 9 рекам низших порядков будут назначены более высокие порядки. Страллер [Strahler, 1952] показал, что второе правило Хортона нарушает основной принцип классификации – на одном уровне должны находиться объекты с одинаковыми признаками. Это, безусловно, так, однако опытный геолог или

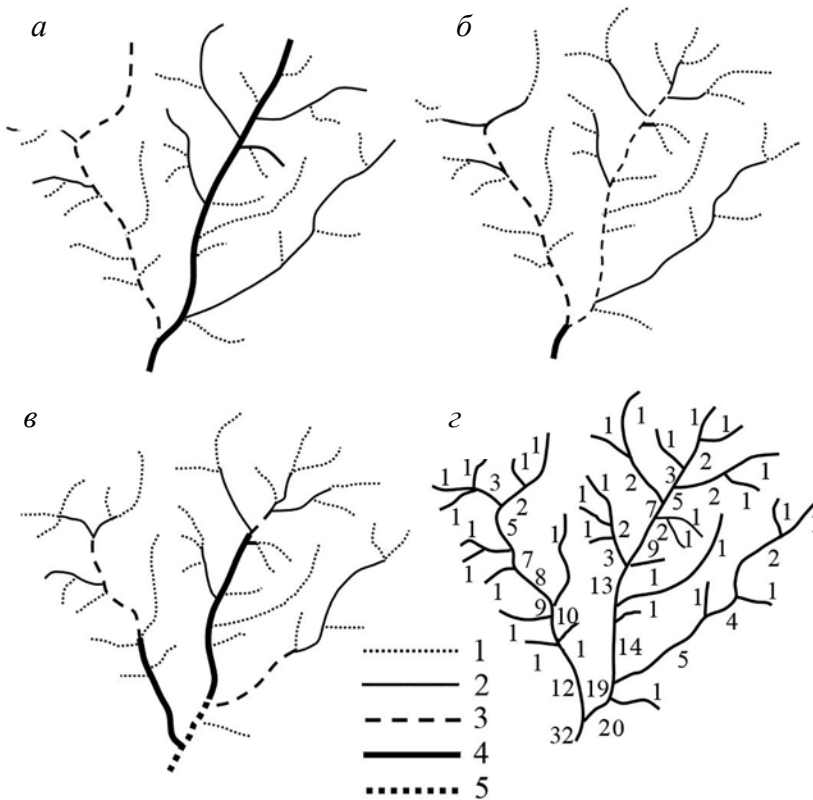


Рис. 1.3. Классификации речной сети по Хортону (а), Страллеру (б), Ржаницыну (в) и Шриву (г). 1 – реки I порядка, 2–5 – II, III, IV и V порядков. На схеме Хортон (а) жирной линией обозначена главная река. Остальные обозначения в тексте. Из: [Карасев, Лобанова, 1981]

геоморфолог знает, что долины рек, особенно в горных районах, наследуют разломы земной коры, которые также делятся (ранжируются) на планетарные и более мелкие структуры, в которых на суше в основном и формируется речная сеть [Геренчук, 1960; Герасимов, 1976; Худяков, 1977]. Часто реки низких порядков, отнесенные к главной реке, имеют более глубокий врез в коренные породы по сравнению с другими реками того же порядка и теоретически должны обладать большими дренажными свойствами.

Чтобы привести метод назначения порядков рек Хортон к установленным правилам классификации, Страллер [Strahler, 1952] предложил свой метод, который был широко распространен среди гидрологов и геоморфологов и во многих источниках стал называться методом Хортон–Страллера. Уместно будет отметить, что в нашей стране Философовым [1967, 1975] примерно в то же время начались исследования структуры речной сети для поиска геологических структур, поэтому в отечественной геолого-географической

литературе можно встретить название метода назначения порядка рек Хортон–Философова. В этом методе, как и в методе Хортон, все малые (приводораздельные) реки – которые текут во влажную погоду и обычно являются сухими [Strahler, 1952] – назначены как реки I порядка. Реки II порядка формируются слиянием любых двух рек I порядка; III порядка – слиянием любых рек II порядка. Страллер отказался от назначения главной реки, но оставил «недостаток» метода Хортон: большое число рек меньшего порядка может впадать в реки более высокого порядка, увеличивая сток, но не увеличивая порядок. Этот недостаток был устранен в системах Шрива [Shreve, 1967] и Шайдеггера [Scheidegger, 1965], предложивших альтернативный подход, основанный на суммировании по определенным правилам всех рек выше по течению.

Определение порядков рек, кроме прочего, имеет проблемы выбора подходящего масштаба карт для назначения рек I порядка [Гарцман, 1968, 1973]. Реки I порядка, полученные с общедоступных карт, скажем, масштаба 1 : 1000 000 (1 см на карте равен 10 км на местности), на самом деле могут оказаться реками скорее III и даже IV порядка при последующем обследовании в поле. Существует и другой подход к определению рек I порядка. Так, Лотспейч считает, что это реки «с достаточно продолжительным стоком, чтобы поддерживать водную биоту во все сезоны» [Lotspeich, 1980, p. 582].

Для горных районов нами предлагается рассматривать исток реки I порядка в месте резкого перегиба продольного профиля долины, который, как правило, находится на контакте с приводораздельным склоном. На этом склоне крутизной 20–50° имеется одна, реже две–три эрозионные борозды V-образной формы с врезом 10–15 м. В месте перехода к днищу долины реки I порядка с врезом (превышением водоразделов над дном долины в поперечном сечении) от 50 до 500 м (в зависимости от геологических условий) уклон русла уменьшается до 5–10°, и именно в этом месте образуется один или несколько ключей, питающих реку I порядка.

Вопрос о реках I–II порядков, в которых наблюдается течение воды в периоды значительного увлажнения, поднимался [Нежиховский, 1971; Гарцман, 1973] в связи с концепцией динамики структуры речной сети. Действительно, в равнинных условиях верхние звенья гидрографической сети функционируют только в периоды весеннего половодья. Это открывает перспективы в оценке водности рек методами дистанционного зондирования, так как речная сеть с водой хорошо видна на космических снимках современного ТВ-разрешения.

Попытки оценки динамики первичных сегментов горной речной сети были предприняты в верховьях р. Хрустальная (Приморский край) на Кавалеровском стационаре Тихоокеанского института географии ДВНЦ АН СССР в 1975–1976 гг. Результаты оказались следующими. Речная сеть в указанном районе не

меняет своей структуры в периоды различной водности. Истоки рек I порядка располагались, как говорилось выше, в распадках в виде ключей, вытекающих в области контакта дна долины со склоном, примыкающим к водоразделу: в засушливые периоды они снижали свой дебит (в зимний период здесь всегда образовывались наледи), в периоды повышенного увлажнения – увеличивали его. Позднее эти выводы были подтверждены исследованиями в горных верховьях р. Силинка (Нижний Амур), где производились полустационарные исследования лабораторией гидрологии Хабаровского КНИИ ДВНЦ СССР с 1977 по 1980 г. [Федоровский, 1985].

В России исследования морфометрических характеристик рек для самых различных целей бурно развивались в 70–начале 80-х годов. На рис. 1.4. приведены графики связи числа рек с величиной их порядка по Хортону–Страллеру. Хорошо видно, что в полулогарифмическом масштабе зависимости спрямляются.

Для рек, имеющих более молодые системы, разброс точек выше (пунктир) [Карасев, Лобанова, 1981]. В работе авторами показано, что хорошую зависимость от порядка рек имеют также длины рек и площади их бассейнов.

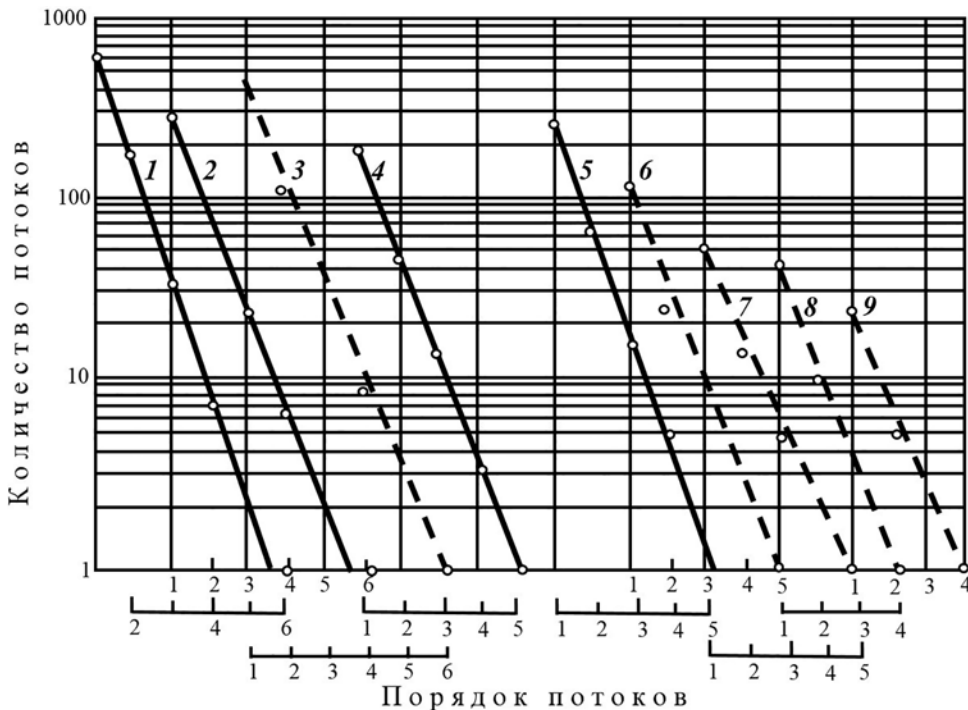


Рис. 1.4. График зависимости количества рек в бассейне оз. Ханка от их порядка. 1 – бассейн р. Комиссаровка; 2–4, 6–9 – бассейны рек Мельгуновка, Илистая, Спасовка, Снегуровка, Абрамовка, Черниговка, Осиновка; 5 – горная часть бассейна р. Илистая выше с. Ивановка. Из: [Карасев, Лобанова, 1981]

1.1.2. Вода в состоянии покоя и движения

В одном из разделов гидромеханики изучается равновесие жидкостей, в том числе и воды, в состоянии покоя в поле тяжести. Данный раздел получил название *гидростатика*. В другом разделе этой науки – *гидродинамике* – жидкость изучается в состоянии движения. Законы и уравнения гидромеханики – зависимость давления от глубины, уравнение Бернулли и другие широко применяются в инженерных науках. Все водные организмы и растительность, их среда обитания находятся под постоянно меняющимся воздействием водных масс, однако далеко не просто понять, а самое главное, количественно описать эти взаимодействия с точки зрения гидромеханики. Лишь в последние десятилетия данным проблемам стало уделяться большое внимание [Allan, Castillo, 2007].

Строение воды

Молекула воды состоит из одного атома кислорода и двух атомов водорода. Атомы находятся в постоянном движении, и в этой связи модель молекулы достаточно условна. Так, ядра атомов молекулы воды (рис. 1.5, 1) в некотором равновесном состоянии образуют равнобедренный треугольник. Угол при вершине треугольника у водяного пара составляет $104^{\circ}27'$, у воды – $104^{\circ}4'$, а у льда – 109° . Меняются и межатомные расстояния: наименьшие они у пара, а наибольшие – у льда [Алексеевский, 2006]. Положение атомов влияет на энергию молекулы. При взаимодействии воды с другими веществами ее молекула претерпевает изменения.

Если соединить прямыми линиями эпицентры положительных и отрицательных зарядов, получится объемная геометрическая фигура – правильный тетраэдр (рис. 1.5, 2). Каждая молекула воды связывается с 4 соседними молекулами, образуя своеобразные *структуры* (рис. 1.5, 3, 4). Только в парообразном состоянии водородные связи в воде разрушаются. В обычных условиях структурное объединение молекул в воде сохраняется; даже в кипящей воде доля

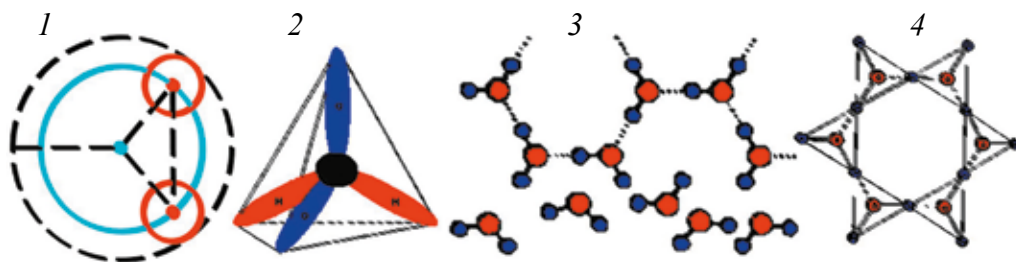


Рис. 1.5. Электронное (1) и объемное (тетраэдр) (2) строение молекулы воды; объединение молекул воды в структуры (3); гексагональная (шестигранная) структуры воды, характерная для льда, снега и талой воды (структурированная вода) (4). Из: <http://www.meanders.ru>

сохранившихся водородных связей составляет 32,5 % [Алексеевский, 2006]. Из всего многообразия этих структур в природе базовой является гексагональная (шестигранная) структура, когда шесть молекул воды (тетраэдров) объединяются в кольцо (рис. 1.5, 4). Такой тип структуры характерен для льда, снега и талой воды, которую иногда называют структурированной водой.

Силы, действующие на объем жидкости, считаются внешними, подразделяясь на *поверхностные* и *массовые* (объемные). Поверхностные силы проявляются на граничных поверхностях жидкого тела. Поверхностную силу, действующую нормально к какой-либо площадке, называют силой давления. Поверхностная сила, действующая по касательной к площадке, является силой сопротивления. Сила сопротивления проявляется только при движении жидкости, а сила давления – как при движении, так и при покое жидкости.

К важнейшим свойствам воды относится *плотность* (ρ), которая представляет собой массу единицы объема, т.е.

$$\rho = \frac{M}{W}, \quad (1.1)$$

где M – масса; а W – объем жидкости.

Единицей измерения плотности служат кг/м^3 в системе СИ. Плотность жидкости зависит от температуры (табл. 1.1). С плотностью воды связан ее

Таблица 1.1. Физические характеристики воды и некоторых других веществ по: [Gordon et al., 2004]

Вид жидкости	Температура, °C	Плотность (ρ), кг/м ³	Коэффициент вязкости	
			динамический (μ), н · с/м ²	кинематический (ν), м ² /с
Пресная вода	0*	999,9	0,001792	0,000001792
	4	1000,0	0,001568	0,000001568
	10	999,7	0,001308	0,000001308
	15	999,1	0,001140	0,000001141
	20	998,2	0,001005	0,000001007
	25	997,1	0,000894	0,000000897
	30	995,7	0,000801	0,000000804
	40	992,2	0,000656	0,000000661
Морская вода**	0	1028	0,001890	0,00000184
	20	1024	0,001072	0,000001047
Воздух	0	1,293	0,00001709	0,00001322
	20	1,205	0,00001808	0,00001500
	40	1,128	0,00001904	0,00001688
Масло	20	933	0,26	0,000279
Глицерин	20	1263	1,5	0,001190
Ртуть	20	13546	0,001554	0,000000115

* Лед при 0 °C имеет плотность 917.

** При солёности 35 ‰.

удельный вес (γ), равный не массе, а весу единицы объема жидкости, т.е.

$$\gamma = \frac{G}{W}, \quad (1.2)$$

где G – вес, а W – объем жидкости.

Единица измерения удельного веса в системе СИ – н/м³, символ «н» обозначает единицы измерения силы в ньютонах¹. Между плотностью и удельным весом существует соотношение $\gamma = \rho g$, где g – ускорение свободного падения, зависящее от широты места.

Одно из важнейших свойств жидкости – *вязкость*. Она связана со способностью оказывать сопротивление сдвигу ее слоев. Ее еще называют внутренним трением. Механизм формирования вязкости весьма сложен и изучен недостаточно, на практике используется концептуальная модель этого явления, обоснованная еще Ньютоном. В связи с вязкостью следует упомянуть и *сжимаемость*, представляющую собой изменение объема на единицу изменения внешнего давления. Так как сжимаемость воды незначительная, то ею часто пренебрегают, считая удельный вес и плотность воды не зависящими от давления. В ряде задач не учитывается и вязкость воды. Теоретическая модель несжимаемой и невязкой жидкости носит название *идеальной жидкости* [Чертоусов, 1957]. В модели Ньютона вязкость жидкости связана со сдвигом ее слоев. Под действием внешних сил в жидкости возникает *механическое напряжение* (или просто *напряжение*), обычно определяемое как предел отношения силы к поверхности, к которой она приложена [Караушев, 1969]. В зависимости от направления действия внешних сил различают нормальные (1) и касательные (2) силы и напряжения (рис. 1.6). Нормальной силой в воде является давление, которое в покоящейся жидкости называется *гидростатическим*, а в движущейся – *гидродинамическим*. Касательные силы – это силы сдвига, приложенные к слоям воды. На рис. 1.6, 3 показана концептуальная схема взаимодействия двух очень тонких слоев воды, движущихся под действием силы F с различными скоростями – v_1 и v_2 , причем $v_1 > v_2$. На границе слоев возникает сила вязкого трения ($-F\mu$), противоположная по направлению силе F .

Кроме внешних сил в воде действуют так называемые *массовые* или *объемные* силы, к которым относятся молекулярные силы, сила тяжести, архимедова сила, а также силы инерции (для движущейся воды).

Между слоями воды, движущимися в *ламинарном потоке* со скоростями, отличающимися друг от друга на величину dv , для преодоления вязкостного сопротивления возникает касательное напряжение τ , которое устанавливается из гипотезы Ньютона:

$$\frac{F\mu}{S} = \tau = \pm \mu \frac{dv}{dn}, \quad (1.3)$$

¹ Один ньютон – это сила F , которая сообщает телу, имеющему массу (m) 1 кг, ускорение (a), равное 1 м/с², т.е. $F = ma$.

где μ – динамический (физический) коэффициент вязкости; dv/dn – градиент (приращение или убывание) скорости по нормали к поверхности, на которую действует сила.

Единицы измерения касательного напряжения – н/м². Знак (+) или (–) в формуле выбирают в зависимости от знака градиента скорости и направления силы $F\mu$. Единица измерения коэффициента динамической вязкости – н · с/м² = Па · с, где символ «Па» обозначает единицы измерения давления (механического напряжения) в Паскалях в системе СИ². Отношение динамической (физической) вязкости к плотности воды называют кинематической вязкостью:

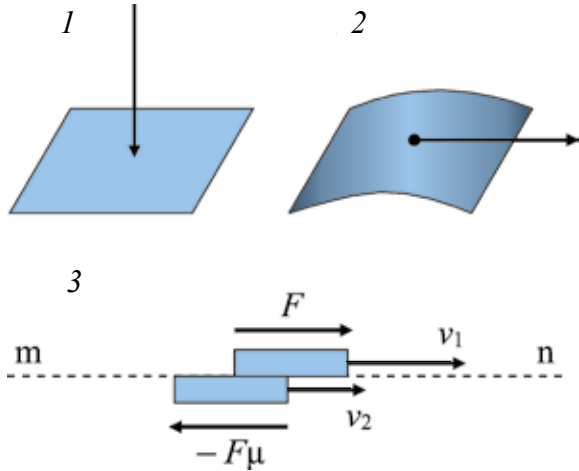


Рис. 1.6. Направление действия нормальной (1) и касательной (2) силы. Схема (3) возникновения касательной силы вязкого трения ($-F\mu$) на границе (mn) двух слоев жидкости, движущихся под действием силы (F) с разными скоростями ($v_1 > v_2$).

Из: [Караушев, 1969]

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (1.4)$$

Единица измерения кинематической вязкости – м²/с. В турбулентных потоках для определения касательных напряжений применяют то же уравнение Ньютона:

$$\tau = \pm A \frac{dv}{dn}, \quad (1.5)$$

где A – коэффициент турбулентной вязкости, причем его величина значительно превышает μ при прочих равных условиях. Вязкость существенно зависит от температуры и плотности [Алексеевский, 2006]. Значение коэффициента динамической (физической) вязкости μ для пресной воды, полученное опытным путем для $t = 0^\circ\text{C}$, равно $1,792 \cdot 10^3$ Па · с.

В тонкой стеклянной трубке (капилляре) со смачиваемыми стенками, опущенной в чашку с водой, образуется мениск с вогнутой поверхностью, который поднимается на некоторую высоту, называемую высотой капиллярного поднятия $h_{\text{кп}}$ (рис. 1.7, 1, 3). По одной теории [Алексеевский, 2006], это происходит за счет действия сил поверхностного натяжения (капиллярного всасывания) $F = \delta \cdot l$, где δ – коэффициент поверхностного натяжения, н/м;

² 1 Па = 1 н/м² = 1 кг/(м · с²). Применяют также более крупные единицы: КПа = 1000 Па, МПа = 1000000 Па.

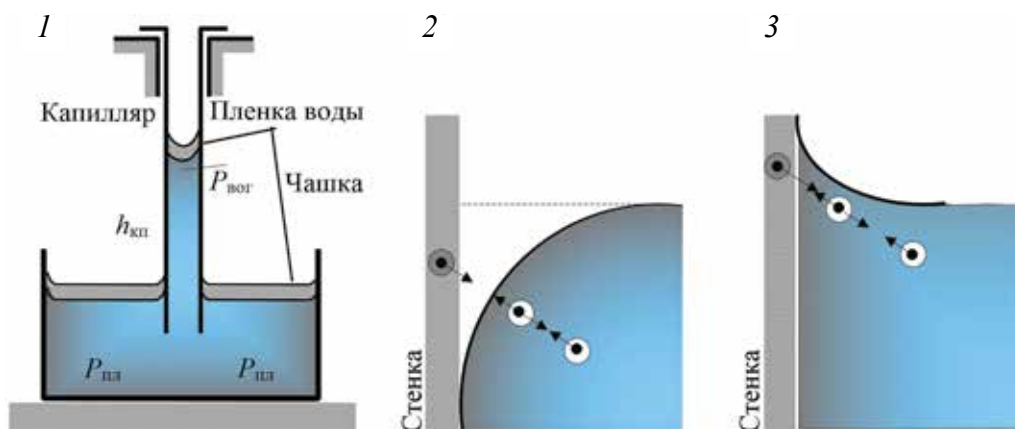


Рис. 1.7. Подъем воды в капилляре (1) из-за превышения давления $P_{пл}$ над $P_{вог}$; выпуклый мениск (2) у несмачиваемой стенки и вогнутый мениск (3) у смачиваемой стенки.
Из: [Чугаев, 1982]

l – длина контура поверхности жидкости. Алексеевский [2006] ссылается на исследование Винникова и Проскуракова [1988], в котором показано убывание δ с ростом температуры и незначительное влияние на δ минерализации. Отмечается также, что поверхностное натяжение воды весьма велико; больше только у ртути.

По другой теории [Чугаев, 1982], капиллярное поднятие может быть объяснено превышением давления плоской поверхности пленки ($P_{пл}$) в чашке над давлением вогнутой поверхности ($P_{вог}$) в капилляре. Поверхность воды в чашке, по Чугаеву, действует как «поршень», выдавливая воду в трубку. Эта теория объясняет и другое явление. Если поверхность капилляра несмачиваемая – образуется выпуклый мениск (рис. 1.7, 2), в котором давление поверхности пленки $P_{вып}$ выше, чем давление $P_{пл}$ на плоской поверхности, и уровень воды в трубке, опущенной в воду, будет ниже, чем в чашке.

Вода обладает особенными *тепловыми свойствами*. Она поглощает огромное количество тепла на свое нагревание. Процесс изменения температуры воды характеризуется так называемой *удельной теплоемкостью* C , равной затратам тепла на нагревание 1 кг воды на 1°C и измеряемой в джоулях на килограмм–градус – $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ [Алексеевский, 2006]. Удельная теплоемкость зависит от температуры. В табл. 1.2 приведены ее значения для некоторых температур при атмосферном давлении. Как видно из табл. 1.2, при переходе из твердого (льда) в жидкое состояние удельная теплоемкость воды возрастает почти вдвое – с 2,039 до 4,206 $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$. Затем она вновь снижается почти в 2 раза при переходе воды в парообразное состояние [Алексеевский, 2006]. Переход воды из жидкого состояния в газообразное сопровождается поглощением тепла, обычно характеризуемым удельной (отнесенной к единице массы

Таблица 1.2. Значения удельной теплоемкости воды для некоторых температур по: [Gordon et al., 2004]

Температура воды, °С	Удельная теплоемкость, Дж/(кг · °С)
Лед	2,039
0	4,206
10	4,191
20	4,181
30	4,176
40	4,177
50	4,183

воды m) теплотой испарения L (Дж/кг). Как следствие, происходит охлаждение испаряющей поверхности.

Конденсация водяных паров из воздуха сопровождается выделением примерно такого же количества тепла. Алексеевский [2006] приводит эмпирическую формулу, установленную Винниковым и Проскуряковым [1988], для оценки L в зависимости от температуры t_n испаряющей поверхности:

$$L = 10^5(25 - 0,024 \times t_n), \quad (1.6)$$

где $25 \cdot 10^5$ Дж/кг – удельная теплота испарения при $t_n = 0$ °С.

Тепловые процессы на реках и водоемах приводят к ледообразованию, играющему огромную роль в формировании условий обитания водных организмов и растительности. В осенне-зимний период на фоне общего снижения температуры воды, замедляющего практически все биохимические и биологические процессы, ледовый покров, с одной стороны, снижает приток кислорода, отвод углекислого и других газов, но, с другой – существенно препятствует промерзанию рек до дна. Подо льдом меняется не только тепловой, но и скоростной, гидрохимический и другие режимы рек.

Взаимодействие воды с атмосферой

Водная поверхность находится под воздействием солнечной радиации, атмосферного давления и ветра, между водой и атмосферой происходит постоянный газовый и тепловой обмен. Поверхность воды отражает значительную часть *солнечной радиации*. Эта способность носит название *альбедо* (A) и выражает долю отраженной суммарной солнечной радиации Q_s (прямой плюс рассеянной). Альбедо зависит от высоты Солнца над горизонтом (табл. 1.3).

В летний полдень в средних широтах России высота Солнца достигает 45–55° и доля отраженной радиации снижается до 2–4 %, остальная часть солнечной радиации поглощается. При прочих равных условиях альбедо существенно зависит от мутности воды. Так, при значениях мутности 0,03; 0,5 и 2,5 кг/м³ альбедо возрастает соответственно до 23, 27 и 35 %. Дальнейший

Таблица 1.3. Изменение альбедо (%) от высоты стояния Солнца над горизонтом в угловых градусах

Угол падения, ϕ	0	10	20	30	40	50	60
Альбедо, A	100	35,0	13,6	6,2	3,5	2,5	2,2

рост мутности воды не ведет к существенному росту альбедо. В водной толще солнечная энергия, поступающая к поверхности Q_s (Вт/м²), претерпевает рассеивание и поглощение. Оценить количество солнечной радиации Q_h на некоторой глубине h можно по уравнению Ламберта:

$$Q_h = Q_s(1 - A) \exp[-(\beta + k)h], \quad (1.7)$$

где $(\beta + k)$ – составной коэффициент ослабления солнечной радиации.

С глубиной интенсивность солнечной радиации снижается. Рассеивание света зависит от мутности и цветности воды, а также от длины световой волны. Алексеевский [2006] отмечает, что при небольшой цветности и малой мутности североамериканских озер в верхнем метровом слое поглощается около 71–78 %, а в пятиметровом – 94,4–95,6 % суммарной солнечной радиации. При высокой мутности воды Цимлянского и Успенского водохранилищ в двухметровом слое поглощается практически вся солнечная радиация.

Атмосферное давление $P_{\text{атм}}$ относится к внешним силам, оно обусловлено весом воздушного столба. Атмосферное давление, равное давлению столба ртути высотой 760 мм при температуре 0 °С, называется нормальным атмосферным давлением. В системе СИ давление измеряется в паскалях (Па). Используются внесистемные единицы давления: 1 атм = 101325 Па = 760 мм рт. ст.

В воде растворено большое количество атмосферного воздуха. Концентрация газов в воде обычно падает с повышением температуры воды и снижением атмосферного давления. При температуре 20 °С и нормальном атмосферном давлении в воде содержится около 1,6 % растворенного воздуха по объему ($k_p = 0,016$).

Кислород отличается более высокой растворимостью, чем воздух, поэтому содержание кислорода в воздухе, растворенном в жидкости, примерно на 50 % выше, чем в атмосферном воздухе. При уменьшении давления газ из жидкости выделяется. Процесс выделения газа протекает интенсивнее, чем растворение. Согласно этому закону растворимость каждой составной части смеси газов в жидкости пропорциональна парциальному (частичному) давлению данной составляющей части над раствором. Алекин [1970] отмечает, что из-за этого, например, азота в воде больше, чем кислорода, несмотря на то, что способность к растворению в воде азота меньше, чем кислорода. Так как азота в воздухе в 4 раза больше, чем кислорода, то растворимость этих газов при 0° соответственно равна 23,3 и 14,5 мг/л.

Кислород (O_2). Содержание растворенного в воде кислорода, кроме потенциального, определяемого законом Генри–Дальтона, зависит от выделения кислорода водной растительностью и фитопланктоном в процессе фотосинтеза. Растительность при этом усваивает (ассимилирует) углекислый газ CO_2 . Выделение растительностью O_2 увеличивается при повышении температуры воды и концентрации питательных веществ (фосфора Р, азота N и др.). Снижает содержание O_2 в воде, кроме выделения в атмосферу, потребление на дыхание водных организмов, разложение органических веществ и окисление $Fe^{''}$, $Mn^{''}$, $NO_2^{'}$, H_2S и других веществ.

Для оценки влияния процессов, изменяющих содержание кислорода в воде, кроме выражения его величины в абсолютной форме (мг/л) применяют такую относительную форму, как процент насыщения воды кислородом по отношению к нормальному его содержанию согласно закону Генри–Дальтона (табл. 1.4). Процент насыщения определяется по формуле:

$$O_2(\%) = \frac{Q_2(\text{мг} / \text{л}) \times 100 \times 760}{N \times P}, \quad (1.8)$$

где N – нормальная концентрация O_2 при данной температуре, минерализации воды и нормальном атмосферном давлении 760 мм ртутного столба (табулированная величина); P – атмосферное давление над водной поверхностью.

Например, если концентрация O_2 в воде при нормальном давлении и температуре 20 °С составляет 8,2 мг/л, то процент насыщения (% нас.) составит $8,2/9,1 \times 100 \% = 90,1 \%$.

Углекислый газ CO_2 . Двуокись углерода, или углекислый газ, несмотря на большую растворимость, присутствует в воде в количестве около 0,72 мг CO_2 /л при давлении 760 мм и температуре 12 °С. Причина в низком его парциальном давлении в атмосфере. Основным источником CO_2 в воде служат прежде всего процессы окисления органического вещества. Уменьшение содержания

Таблица 1.4. Концентрация насыщения растворенного в воде кислорода при атмосферном давлении 760 мм и нулевой солёности по: [Gordon et al., 2004]

Температура воды, °С	Концентрация кислорода, мг/л
0	14,6
5	12,7
10	11,3
15	10,1
20	9,1
25	8,2
30	7,5
40	6,4

двуокиси углерода происходит в результате фотосинтеза, расхода на растворение карбонатов (CaCO_3), химическое выветривание алюмосиликатов (AlSiO_4 и др.) и выделение в атмосферу. Двуокись углерода имеет большое значение как источник углерода для питания растительности, без которой в природных водах не было бы жизни [Алекин, 1970].

Водород Н (рН). Ион водорода всегда присутствует в природной воде из-за диссоциации самой воды $[\text{H}_2\text{O}] \leftrightarrow [\text{H}^+] + [\text{OH}^-]$, а также многих кислот. Концентрацию ионов водорода из-за малой величины принято выражать в виде логарифма с обратным знаком: $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$. Для перевода Н' в рН имеются специальные таблицы. Несмотря на небольшое содержание в воде роль ионов водорода заключается в поддержании равновесия всей химической системы воды.

Когда концентрации обоих видов ионов ($[\text{H}^+]$ и $[\text{OH}^-]$) в воде одинаковы, вода имеет нейтральную реакцию и $\text{pH} = 7$. Когда $[\text{H}^+] > [\text{OH}^-]$, говорят, что раствор является кислым ($\text{pH} < 7$), а при $[\text{OH}^-] > [\text{H}^+]$ – щелочным ($\text{pH} > 7$). Теоретически значение рН изменяется от 0 до 14. В поверхностных водах величина концентрации ионов водорода колеблется в пределах от 6,5 до 8,5 рН.

Биогенные вещества. К ним относятся азот, фосфор, а также железо и кремний в различных соединениях. Азот и фосфор имеют огромное значение как питательные вещества в развитии жизни в водоемах. Азот встречается в виде неорганических соединений (аммонийных NH_4 , нитритных NO_2 , нитратных NO_3 ионов) и органических остатков, образованных при распаде белка тканей организмов. Органическое вещество в реке усваивается бактериями, которые используют растворенный в воде кислород для переработки этого вещества. Увеличение органики (сточные воды, размыв органических отложений или перегрузка опавшими листьями) стимулирует рост числа бактерий. Если приток органики слишком велик, то растворенный в воде кислород может быть полностью использован бактериями. В таких реках условия жизни могут быть не пригодными для организмов, чувствительных к содержанию в воде кислорода.

Вода в состоянии покоя (гидростатика)

Этот раздел гидромеханики изучает законы равновесия *неподвижной* водной массы, находящейся под действием *внешних* сил, вызывающих *внутри* водного тела напряжения сжатия, которые в гидравлике называются *давлением (Р)*. Напряжения, возникающие под действием внешних сил, зависят от положения произвольной точки, находящейся в воде, в некоторой системе координат независимо от времени. В этой связи основная задача сводится к определению давления воды как функции координат и передачи этого давления твердым телам на различной глубине.

Как отмечалось выше, любое водное тело (например, участок реки или другого водоема) находится под действием поверхностных и внутренних (массовых) сил. К поверхностным силам относят силы поверхностного натяжения и внешнего давления (в условиях свободной водной поверхности – атмосферного). К массовым (объемным) силам относят молекулярные силы, силы тяжести и инерции, а также силы, выталкивающие тела из воды и называемые часто архимедовой силой. Поверхностные силы, в зависимости от направления своего действия, могут быть нормальными и касательными (рис. 1.6).

Напряжения в воде возникает под действием сжимающих сил. Так как рассматривается некоторый объем воды в состоянии покоя, то нормальная сила F_n , направленная внутрь объема воды под прямым углом к его поверхности, вызывает нормальные напряжения, называемые *гидростатическим давлением* ($P_{гст}$). Отнеся приращение этой силы ΔF_n к некоторой площадке в воде ΔS , получим формулу для расчета гидростатического давления:

$$P_{гст} = \frac{\Delta F_n}{\Delta S}. \quad (1.9)$$

Основное уравнение гидростатики определяет величину давления внутри покоящейся жидкости. Рассмотрим элементарную площадку ΔS на некоторой глубине h_s в сосуде с водой (рис. 1.8). Так как вода находится в состоянии покоя, то силы, действующие на площадку ΔS , уравновешены. Сверху на площадку действует внешнее давление P_0 , в частном случае оно может быть равно атмосферному давлению, т.е. $P_0 = P_{атм}$, а также вес столба воды над площадкой высотой h_s (рис. 1.8). Они уравновешиваются действующим на площадку снизу внутренним давлением P_s . В таком случае можно записать выражение баланса давлений:

$$P_0 \Delta S + \rho g h_s \Delta S = P_s \Delta S,$$

где ρ – плотность; g – ускорение свободного падения.

Поскольку выбор площадки был произвольным, разделив уравнение на ΔS , получим выражение для давления P в любой точке на глубине h покоящейся жидкости:

$$P = P_0 + \rho g h, \quad (1.10)$$

которое носит название основного уравнения гидростатики.

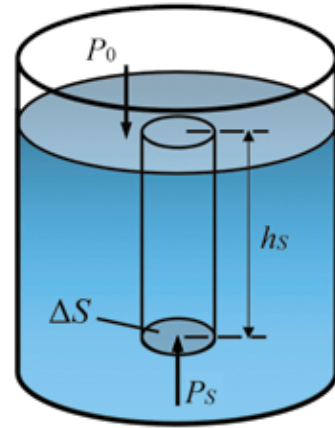


Рис. 1.8. Схема к выводу основного уравнения гидростатики. Обозначения в тексте

Таким образом, полное гидростатическое давление P в некоторой точке водного тела складывается из давления на поверхности и добавочного гидростатического давления, выраженного величиной ρgh и численно равного весу столба жидкости высотой h с единичным основанием. Существуют и другие формы записи этого уравнения, а более строгий его вывод содержится, например, в монографии Караушева [1969].

Из основного уравнения гидростатики следует, что при любой глубине погружения на объект действует внешнее давление P_0 . Из уравнения вытекает закон Паскаля, который гласит: давление, приложенное к граничной поверхности покоящейся жидкости, передается всем точкам этой жидкости по всем направлениям одинаково. Далее следует, что на равной глубине в покоящейся жидкости давление одинаково, т.е. существуют горизонтальные поверхности равного давления (изобарические поверхности). Существование поверхностей равного давления позволяет измерять давление в любой глубине, что особенно актуально, если P_0 не равно атмосферному давлению, например, в замкнутых резервуарах.

Для измерения давления используются различные приборы, в том числе пьезометры, представляющие собой прозрачную трубку, присоединенную к стенке резервуара на требуемой глубине, т.е. на уровне поверхности равного давления, соединительным шлангом. В пьезометре установится уровень жидкости, называемый *пьезометрической высотой* $h_{\text{пъез}}$, пропорциональный давлению на заданной глубине резервуара (трубка справа от резервуара, рис. 1.9). Отношение P к удельному весу γ носит название *приведенной высоты давления* $h_{\text{пр}}$ и имеет размерность длины. По определению такая высота столба жидкости

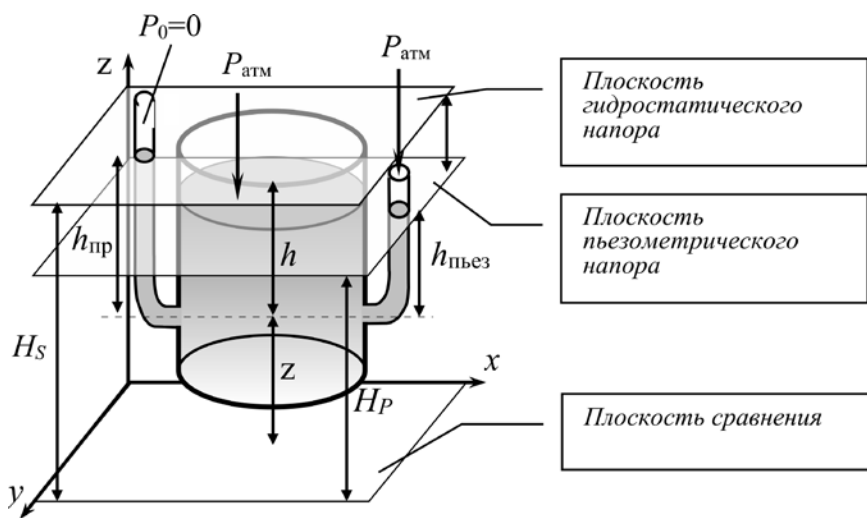


Рис. 1.9. Схема к расчету гидростатического H_S и пьезометрического H_P напоров.
Обозначения в тексте

устанавливается в запаянной пьезометрической трубке, из которой предварительно откачан воздух (трубка слева от резервуара, рис. 1.9), $h_{\text{пр}}$ численно равна полному гидростатическому давлению на данной глубине h . Введя плоскость сравнения (рис. 1.9), получают определение *гидростатического напора* H_s как суммы приведенной высоты давления $h_{\text{пр}}$ и высоты измеряемого горизонта над плоскостью сравнения z .

Величина H_s постоянна для всех горизонтов покоящейся водной массы. Сумма высот *пьезометрической высоты* $h_{\text{пьеэ}}$ и величины z дает значение *пьезометрического напора* H_p [Караушев, 1969].

На тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая (*архимедова*) сила F_A , равная весу вытесненной этим телом жидкости, т.е.

$$F_A = \rho g V, \quad (1.11)$$

где ρ – плотность; g – ускорение свободного падения; V – объем погруженного тела (или часть объема тела, находящаяся ниже поверхности).

Тело плавает, если архимедова сила, приложенная к центру его тяжести, уравнивает силу тяжести тела, действовавшей на вытесненный телом объем жидкости. Следует заметить, что тело должно быть полностью окружено жидкостью (либо пересекаться с поверхностью жидкости). Так, закон Архимеда нельзя применить к кубику, который лежит на дне резервуара, герметично касаясь дна.

Вода в состоянии движения (гидродинамика)

Движение воды, характеризующееся скоростью перемещения частиц и гидродинамическим давлением, может быть неустановившимся или установившимся, а также неравномерным, плавно изменяющимся или равномерным.

Неустановившимся называется такое течение воды, при котором его скорость и давление в точке потока изменяются во времени. Если указанные характеристики не зависят от времени, то такое течение воды называется *установившимся*. Неустановившееся движение наблюдается в период паводков и половодий, установившееся – в период летней и зимней межени.

Неравномерным называется такое движение воды, при котором скорость, форма и площадь поперечного сечения меняются по длине потока. Если они не изменяются по длине, то движение называется *равномерным*. Можно выделить также неравномерное, но *плавно изменяющееся* движение, когда указанные характеристики меняются по длине постепенно. Движение воды в естественных руслах по большей части неравномерное либо плавно меняющееся. Лишь на коротких участках, для упрощения расчетов, его принимают равномерным. К истинно равномерному движению воды можно отнести только плоскопараллельное движение воды в круглых трубах и, с некоторой долей условности, в искусственных руслах, каналах с постоянным сечением. При *установившемся*

движении воды форма траекторий не меняется во времени. В случае *неустановившегося* ее движения и направление, и скорость частиц меняются, что ведет к постоянному смещению траекторий в потоке. Теоретически зафиксировать картину движения частиц воды в каждый момент времени удастся с помощью особых линий, называемых *линиями тока*.

В соответствии с физическим *законом сохранения* масса в *любой системе* должна оставаться постоянной во времени. Для воды это означает принцип неразрывности или водного баланса выделенного ее объема. Строго говоря, принцип неразрывности применяется к несжимаемым жидкостям, хотя в большинстве гидрологических приложений вода может рассматриваться как несжимаемая. В соответствии с законом сохранения или принципом неразрывности приток воды к участку реки $Q_{\text{притока}}$ равен оттоку $Q_{\text{оттока}}$ с участка, т.е. уравнение водного баланса участка реки будет иметь простой вид:

$$Q_{\text{притока}} = Q_{\text{оттока}} \quad (1.12)$$

Обобщая формулу (1.12) для большего количества сечений, можно прийти к выводу, что

$$Q = \text{const (вдоль потока)}, \quad (1.13)$$

в научной литературе это уравнение носит название *уравнение неразрывности* [Чугаев, 1982]. Так как $Q = \omega V$, уравнение (1.12) может быть записано в форме

$$\omega_1 V_1 = \omega_2 V_2 \text{ или } \frac{V_1}{V_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1}, \quad (1.14)$$

где Q – расход, м³/с; ω – площадь поперечного сечения, м²; V – средняя скорость, м/с, индексы 1 и 2 указывают на сечения.

Водные потоки в процессе своего движения производят большую работу по эрозии склонов, размыву дна и берегов русла, переносу взвешенного и влекомого по дну твердого материала из-за того, что обладают запасом энергии. Энергия потока включает так называемую *потенциальную энергию* (ПЭ), образующуюся из-за высотного положения и измеряемую над условной плоскостью сравнения:

$$\text{ПЭ} = mgh, \quad (1.15)$$

где m – масса, кг; g – ускорение силы тяжести, м/с²; h – высота над плоскостью сравнения, м; ПЭ измеряется в джоулях.

Потенциальная энергия потока падает по мере снижения h . Большая часть потенциальной энергии преобразуется в *кинетическую энергию* (КЭ) – энергию движения. Для воды массой m КЭ определяется как

$$\text{КЭ} = \frac{1}{2} m V^2, \quad (1.16)$$

где V – скорость, м/с.

На основании учета баланса энергии вдоль элементарной струйки Бернулли в 1732 г. удалось описать соотношение ПЭ и КЭ для установившегося движения [Чугаев, 1982]. Дальнейшие исследования показали [Чертоусов, 1957; Чугаев, 1982], что энергетическое уравнение Бернулли справедливо и для реального речного потока с плавно изменяющимся движением, только здесь характеристики Z , P и V относятся к средним значениям по живому сечению. Для участка реки, ограниченного сечениями в створах 1 и 2, уравнение Бернулли запишется так:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + h_f, \quad (1.17)$$

где Z – высота над плоскостью сравнения; P – давление; V – скорость; α – поправочный коэффициент (корректив), или коэффициент Кориолиса, для КЭ; h_f – потери напора из-за внешних и внутренних сил трения «реальной» вязкой жидкости, а индексы указывают на сечения: 1 – выше по течению, 2 – ниже по течению. Таким образом, энергия сохраняется как вдоль элементарной струйки, так и вдоль потока реки:

$$\text{ЭД} + \text{ПЭ} + \text{КЭ} = \text{const}. \quad (1.18)$$

Величины ПЭ и КЭ определены выше. ЭД – энергия давления, она означает усилие, затрачиваемое, например, при накачивании шины велосипеда ручным насосом или рыбкой-брызгуном при формировании струи брызг на берег или в воздух с целью сбить и потом съесть насекомое (рис. 1.10).



Рис. 1.10. Рыбка-брызгун на охоте за насекомыми. Фото с сайта <http://ianimal.ru>

В своем уравнении Бернулли выразил различные составляющие энергии в единицах напора, удельной энергии, т.е. энергии на единицу веса жидкости, которая имеет размерность длины, м:

$$\text{напор высоты} + \text{напор давления} + \text{напор скорости} = \text{const.} \quad (1.19)$$

В целом это балансовое уравнение означает, что если один член увеличивается, то другой должен уменьшаться. Оно может быть также использовано для объяснения, почему образуется подъемная сила у самолета или у водных организмов (рис. 1.11, 1, 2).

Из рис. 1.11, 1 видно, что линии тока сгущены над верхом крыла, что означает увеличение скорости в этой области. Рост скорости должен быть компенсирован уменьшением давления (так как высота одна и та же). Таким образом, давление над крылом ниже, чем под ним, поэтому появляется подъемная сила $F_{\text{под}}$ на крыле. Аналогичное явление наблюдается в воде у живых организмов. Во время плавания (или в потоке) образуется «водное крыло» у плоских рыб типа камбалы или черепах (рис. 1.11, 2). Подъемная сила $F_{\text{под}}$ также образуется, когда вода начинает течь вокруг закрепившихся на дне водных организмов, форма органов которых способна сформировать «водное крыло». При определенной скорости $F_{\text{под}}$ может превысить порог удерживающей способности организмов, и они окажутся во взвешенном состоянии, что приведет к их искусственному дрейфу.

Дым, поднимающийся, например, от спички, может иметь различную структуру. При спокойном окружающем воздухе и погасшем пламени он поднимается вертикально вверх в виде тонкой пленки (рис. 1.12, 1). Такой режим движения воздуха носит название *ламинарный* (от латинского слова *lamina* – тонкая пластинка).

На рис. 1.12, 2 дым от горящей спички из-за интенсивного подъема горячего воздуха движется хаотично кольцами и разнонаправленными струями. Такой режим движения воздуха носит название *турбулентный* (от латинского слова *turbulentus* – бурный, взволнованный). В водном потоке совсем другие причины образуют аналогичные *ламинарный* и *турбулентный* режимы движения воды, характеризующиеся различным воздействием на русло, наносы и водные организмы.

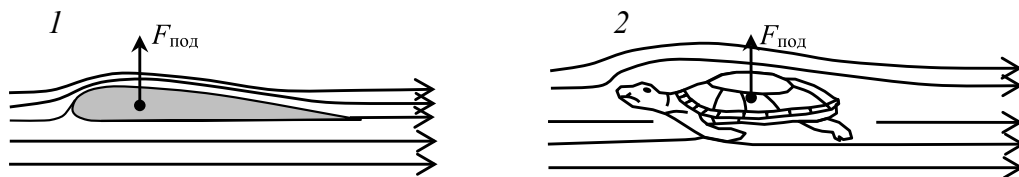


Рис. 1.11. Линии тока и подъемная сила $F_{\text{под}}$ самолетного крыла в воздухе (1) и черепахи в водном потоке (2). Из: [Gordon et al., 2004]

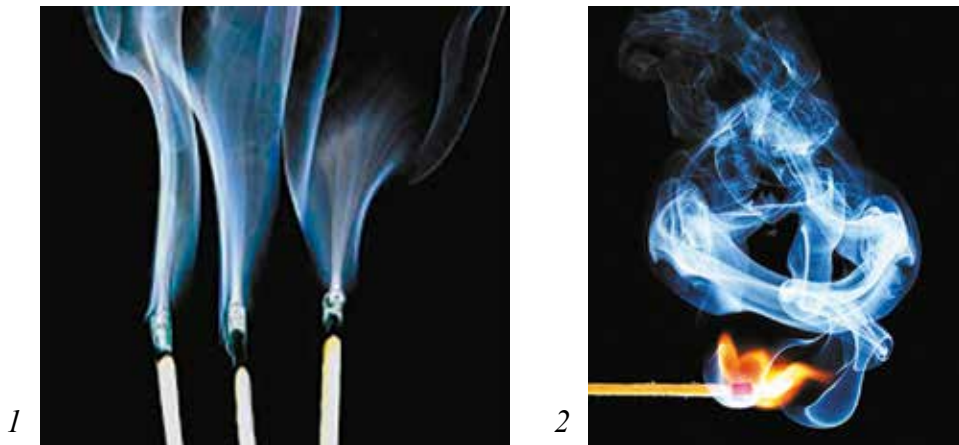


Рис. 1.12. Тонкая структура движения дыма от спички в виде ламинарного потока (1) и в виде турбулентного хаотического движения кольцами и струями (2). Фото с сайтов <http://vk.com> и <http://mirgif.com>

Ламинарный режим. Режимы движения воды хорошо наблюдать в лабораторных условиях на установке (рис. 1.13), предложенной в 1883 г. английским физиком и инженером Осборном Рейнольдсом [Чугаев, 1982].

При небольшой скорости движения воды в трубе введенная через трубку 7 краска не будет перемешиваться с потоком воды, и ее тонкий след отчетливо прослеживается вдоль всей стеклянной трубы 2 (рис. 1.13, а), что указывает на ламинарный (слоистый) характер течения жидкости и на отсутствие перемешивания. Опыты показывают [Чугаев, 1982], что по всей длине трубы неизменны давление и скорость во времени, а эпюра скорости (распределение по живому сечению трубы) в разрезе будет иметь вид параболы. По мере плавного увеличения скорости движения воды в трубе (путем большего открытия крана 3) эпюры скоростей начинают вытягиваться, т.е. скорости в центре трубы растут быстрее, чем ближе к стенкам.

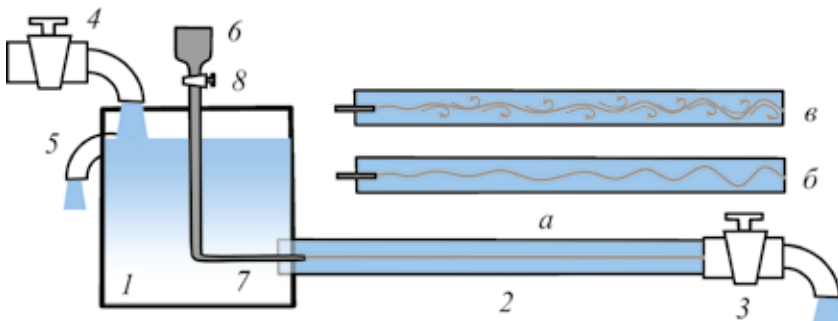


Рис. 1.13. Лабораторная установка Рейнольдса для изучения ламинарного (а) и турбулентного (б, в) режимов движения воды. Остальные обозначения в тексте

В реках ламинарный поток может существовать в виде тонкого слоя близ твердых поверхностей, между камнями, а также в небольших трещинах горных пород или в песках водоносных горизонтов. В этих условиях вода движется параллельными «слоями», которые скользят друг по другу с различными скоростями, но в одном направлении. Слой воды, наиболее близкий к твердой поверхности, тормозится межмолекулярными и другими силами, принуждая ближние слои замедляться. При ламинарном движении количество силы, приложенной к массе жидкости, прямо связано со скоростью, с которой она движется: больше сила – выше скорость. Эта зависимость описана законом вязкости Ньютона:

$$\tau = \pm \mu \frac{dv}{dn}, \quad (1.20)$$

где τ – касательное напряжение (трение) – сила для преодоления сопротивления из-за вязкости воды на единицу площади, н/м²; μ – динамический (физический) коэффициент вязкости; dv/dn – градиент (приращение или убывание) скорости, показывающий изменение скорости v с расстоянием n . Скорость перемещения ламинарного потока v по формуле Пуазейля описывается уравнением:

$$v = \frac{kpg}{\mu IR^2}, \quad (1.21)$$

где k – эмпирический коэффициент; p – давление; g – ускорение силы тяжести; μ – динамический коэффициент вязкости; I – уклон водной поверхности; R – гидравлический радиус (отношение площади поперечного сечения к смоченному периметру). При таком ламинарном течении воды обтекание неровностей на дне реки происходит без образования вихрей. Сила трения не зависит от шероховатости русла [Маккавеев, Чалов, 1986].

Турбулентный режим. Возвратимся к опыту на лабораторной установке Рейнольдса (рис. 1.13): при дальнейшем увеличении скорости течения воды в трубе до определенного значения v_k наступает быстрое изменение картины течения. Струйка краски по выходе из трубки начинает вначале колебаться, а затем на изгибах формируются небольшие вихри, что схематично показано на рис. 1.13, б, в. Затем краска размывается и перемешивается за счет образования поперечных составляющих скорости и вихреобразования. При этом наблюдается непрерывная пульсация давления и скорости по всей длине трубы. Такое движение воды называется *турбулентным*. В то время как ламинарный поток может быть точно описан линейным уравнением, турбулентный – только статистически средними величинами. При турбулентном перемешивании происходит обмен между высоко- и низкоскоростными областями потока: быстрые вихри проникают в области низких скоростей близ твердой поверхности, захватывают некоторые объемы и выбрасывают их в поток, в результате возрастают

низкие и снижаются высокие скорости. Эти флуктуации влияют на среднюю скорость таким образом, что все это можно представить, как увеличение вязкости. Учесть этот эффект в уравнении Ньютона позволяет новый член ε – динамический коэффициент турбулентной вязкости, или турбулентного обмена (вихревая вязкость):

$$\tau_{\text{тр}} = (\mu + \varepsilon) \frac{dv}{dn}. \quad (1.22)$$

Формула (1.22) учитывает и ламинарный, и турбулентный режим. При условии ламинарного потока $\varepsilon = 0$, при турбулентном потоке величина μ пренебрежительно мала. Вихревая вязкость ε определяются экспериментально, так как ε не является свойством жидкости, как μ . Величина $\tau_{\text{тр}}$ много больше, чем τ ламинарного потока, и зависит от квадрата средней скорости. Для определения средней скорости турбулентного течения при равномерном движении потока применяется формула Шези:

$$v = C\sqrt{R \cdot I}, \quad (1.23)$$

где C – определяемый эмпирически по шероховатости русла коэффициент Шези. Остальные обозначения, как формуле (1.21) [Маккавеев, Чалов, 1986].

Рейнольдс, изменяя скорость течения, диаметр трубы и вязкость жидкости на своей установке (рис. 1.13), вывел безразмерную характеристику Re (названную по его имени числом Рейнольдса) в качестве количественного признака перехода потока из ламинарного режима к турбулентному, и наоборот:

$$Re = \frac{VL\rho}{\mu} \text{ или } Re = \frac{VL}{\nu}, \quad (1.24)$$

где V – скорость, м/с; L – некоторая характеристическая (удельная) длина, м; ρ – плотность, кг/м³; μ – динамическая вязкость, н · с/м²; $\nu = \mu/\rho$ – кинематическая вязкость, м²/с.

В уравнении (1.24) члены в числителе связаны с силами инерции, в знаменателе – с силами вязкости. При этом большие значения Re отмечают переход в турбулентный режим, малые – в ламинарный. В опытах Рейнольдса характеристическая (удельная) длина соответствовала диаметру трубы D . Установлено, что при переходе от турбулентного режима поток всегда становится ламинарным, когда скорость сокращается так, что число Re составляет около 2000. Эта точка перехода называется *критическим числом Рейнольдса* ($Re_{\text{кр}}$). Обратный переход к турбулентному режиму не всегда происходит в соответствии с этим числом; в действительности начиная с нулевых скоростей поток мог оставаться ламинарным до значений $Re \approx 50\,000$, хотя был очень нестабильным и становился турбулентным при малейшем толчке [Gordon et al., 2004]. Число Рейнольдса может быть рассчитано и для других условий путем замены соответствующей длины L такими характеристиками, как гидравлический радиус

поперечного сечения реки, длина рыбы или раковины моллюска. Для предметов, погруженных в движущуюся жидкость, преобразование заключается в использовании максимальной длины объекта в направлении течения. Вогель [Vogel, 1981] и Пурсел [Purcell, 1977] экспериментально установили числа Рейнольдса для некоторых объектов на основе их «типичной» длины и скорости плавания, которые ниже приведены в порядке убывания:

<i>Рыба тунец</i>	10 000 000
<i>Олимпийский пловец</i>	10 000
<i>Золотая рыбка или гуппи</i>	100
<i>Личинки беспозвоночных</i>	0,1

Для водных организмов число Рейнольдса имеет существенное значение. Крупные водные обитатели, такие как лосось или осетр, обитают в условиях, в которых силы вязкости не столь существенны по сравнению с силами инерции. В стоячей воде редкие движения хвоста достаточны для продолжения движения крупных обитателей. Однако для бактерий, простейших и других микроорганизмов силы вязкости становятся существенными из-за малых «характеристических длин» L , при которых в соответствии с уравнением (1.24) число Рейнольдса составляет всего 10^{-4} – 10^{-5} . Здесь инерция не существенна в сравнении с вязкостью и движение мгновенно прекращается, когда импульс движения заканчивается. Вместо того чтобы легко скользить в воде, эти организмы перемещают воду вдоль себя, постепенно преодолевая ее сопротивление со своих боков. Вместе с тем есть преимущества жизни организмов с «низкими числами Рейнольдса»: они надежно защищены от перемещения турбулентными вихрями толстым «покровом» жидкости с высокой вязкостью. Однако из-за слабого перемешивания транспорт питательных веществ и газов к организму, удаление отходов или распространение половых клеток (гамет) от него происходят более медленным режимом диффузии. Для закрепленных особей стоячая вода является враждебной средой, и многие организмы имеют механизмы создания турбулентности для улучшения вентиляции и удаления отходов. Мобильные микроорганизмы чаще перемещаются к «пастбищам, покрытым зеленью» для питания, вместо ожидания, пока пища сама придет к ним. Пурсел и Вогель [Purcell, 1977; Vogel, 1981] изложили и другие сведения о биологических аспектах жизни при низких числах Рейнольдса. Статзнер с соавторами [Statzner et al., 1988] указывают, что беспозвоночные часто начинают жизнь в ламинарной области движения воды, характеризуемой числами Рейнольдса около 1–10, но при достижении половозрелой формы они могут жить при турбулентном течении (числа Re около 1000 и выше). Он сделал вывод, что для этих организмов эволюция лежит между низкими и высокими числами Re .

Как отмечает Чугаев [1982], в формуле (1.24) характеристика L может быть заменена на гидравлический радиус R – отношение площади поперечного

сечения к смоченному периметру, что весьма удобно для расчета числа Re для речных русел. В широких и неглубоких реках средняя глубина h служит подходящим приближением для гидравлического радиуса. Тогда форма уравнения числа Рейнольдса (1.24) будет такой:

$$Re = \frac{Vh}{\nu}, \quad (1.25)$$

где h – средняя глубина.

Возвращаясь к экспериментам Рейнольдса, следует указать, что гидравлический радиус в круглой трубе диаметром d выражается соотношением $R = (\pi d^2/4)/\pi d = d/4$ или $d = 4R$. Тогда $Re_{кр}$ для круглой трубы будет равно $2000/4 = 500$. Величина числа Рейнольдса $Re_{кр}$ в круглых трубах может быть грубо перенесена на реки, и переход от ламинарного к турбулентному стоку будет приближенно ожидать при Re от 300 до 1000 [Маккавеев, Чалов, 1986]. Практические расчеты числа Re показывают, что средние условия стока в русле нельзя классифицировать как ламинарные, за исключением, возможно, участков, на которых потоки представляют собой тонкий слой, обтекающий твердые поверхности. Например, если $h = 2$ мм, $V = 0,1$ м/с и $\nu = 10^{-6}$ м²/с, то $Re = 200$, и сток может рассматриваться как ламинарный. Экспериментально ламинарные условия оцениваются визуально, фото- или видеорегистрацией, методом введения в поток красителя или мелких частиц с нейтральной плавучестью.

Поток вдоль поверхностей

Область потока от границы контакта с твердой поверхностью до границы, у которой сток больше не испытывает ее воздействие, называется пограничным слоем [Френкель, 1956; Штеренлихт, 1984]. Внутри его существуют более мелкие пограничные слои на поверхности камней, коряг, рыб и водных насекомых, в действительности многие организмы живут внутри пограничных слоев других организмов. Даже очень быстрые потоки, обтекая камни, покрытые «биопленкой» микроорганизмов, личинок поденок, ручейников, двукрылых и других водных организмов, образуют благоприятную для них микросреду.

Классический подход во многих инженерных разработках теории пограничного слоя заключается в анализе пограничного слоя в простейших условиях стока вокруг гладких, плоских пластин, ориентированных вдоль потока. Распределение скоростей и напряжений около пластины находятся под влиянием природы стока: ламинарного или турбулентного, и характера поверхности: шероховатой или гладкой. Хотя плоская пластина – идеализированный объект, разработанные для нее зависимости полезны для описания структуры скоростей около поверхностей в потоке и для расчетов торможения поверхностным трением водных организмов.

На острой плоской пластине, ориентированной вдоль потока, пограничный слой начинается на передней ее кромке (рис. 1.14), где образуется точка «расщепления потока» с нулевой скоростью, так как здесь поток контактирует с неподвижным объектом и затем разделяется на две составляющие. На некотором расстоянии X вдоль объекта поток ламинарный. Далее слои жидкости затормаживаются из-за сил трения и ламинарный слой становится толще.

Толщина ламинарного пограничного слоя растет от начальной точки до тех пор, пока не станет такой большой, что поток потеряет стабильность и появится турбулентность. Точка перехода происходит при некоторой критической величине числа Рейнольдса, даваемой большинством авторов как $Re_x \approx 500$, где индекс x (расстояние от начала пластины) служит «характеристической длиной», использованной для расчета «местного числа Рейнольдса» по уравнению (1.24), т.е.

$$Re_x = \frac{VX}{\nu}. \quad (1.26)$$

В области перехода ламинарный и турбулентный режимы существуют одновременно. В турбулентной области пограничный слой продолжает расти по мере того, как быстрые и медленные частицы жидкости («моли» жидкости по Штеренлихту [1984]) смешиваются. Так как перемешивание гораздо более эффективно, чем молекулярная диффузия в соединении молей жидкости, граница области турбулентности растет более быстро, чем ламинарный слой (рис. 1.14). В области турбулентности очень тонкий слой ламинарного потока еще существует около твердой поверхности, защищая ее от разрушения. Этот слой называется *ламинарным подслоем*, или *вязким подслоем*. Описанная модель развития пограничного слоя также справедлива для случая, когда набегающий сток ламинарный или пластина сама по себе движется сквозь стоячую

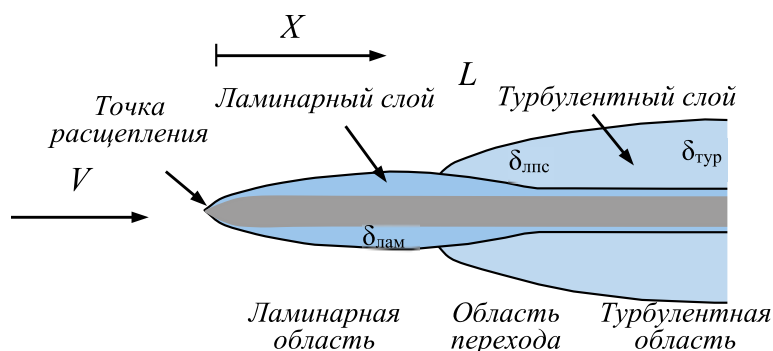


Рис. 1.14. Формирование пограничного слоя около плоской заостренной пластины. V – скорость свободного потока (при отсутствии пластины), X – расстояние от переднего ребра.

Из: [Gordon et al., 2004]

воду и пластина гладкая. Если набегающий поток турбулентный или передняя грань пластины шероховатая, то турбулентность установится гораздо быстрее [Френкель, 1956; Gordon et al., 2004]. В механике жидкости «шероховатость» и «гладкость» имеют очень точное значение, связанное с определением ламинарного подслоя [Гончаров, 1962]. В действительности само существование ламинарного подслоя зависит от того, насколько шероховата поверхность. Говорят, что поверхность гидравлически гладкая (рис. 1.15, 1), если все поверхностные неоднородности h_{Δ} так малы, что практически сливаются с ламинарным подслоем (гладкие пластиковые трубы гидравлически гладкие). Так как толщина ламинарного подслоя изменяется из-за гидравлических свойств поверхности и скорости, высота шероховатости будет определять, «гладкая» эта поверхность или «шероховатая». В реках преобладают гидравлически шероховатые поверхности. Однако, когда неоднородности поверхности очень малы в сравнении с глубиной, как, например, в гладких каменистых потоках или глубоких равнинных реках с дном, покрытым мелким песком, глиной, такие условия можно принять за гидравлически гладкие. Гидравлически гладкими могут быть поверхности погруженных в воду хорошо окатанных камней или листья макрофитов.

Много оригинальных работ выполнено Никурадзе, студентом Прандтля. Никурадзе изучал потери напора из-за трения в трубах, которые были покрыты песчинками однородного размера. Потери напора были определены как функции чисел Рейнольдса и *относительной шероховатости*, где последняя была описана как отношение диаметра песчинок к диаметру трубы.

Эта идея была продолжена для открытых русел, здесь относительная шероховатость $R_{\text{отн}} = k/h$, где k – некоторая мера шероховатости (например, размер частиц, м); h – глубина потока, м. В работах Никурадзе k – это диаметр частиц для всех песчинок одного размера. В его работе предложен критерий

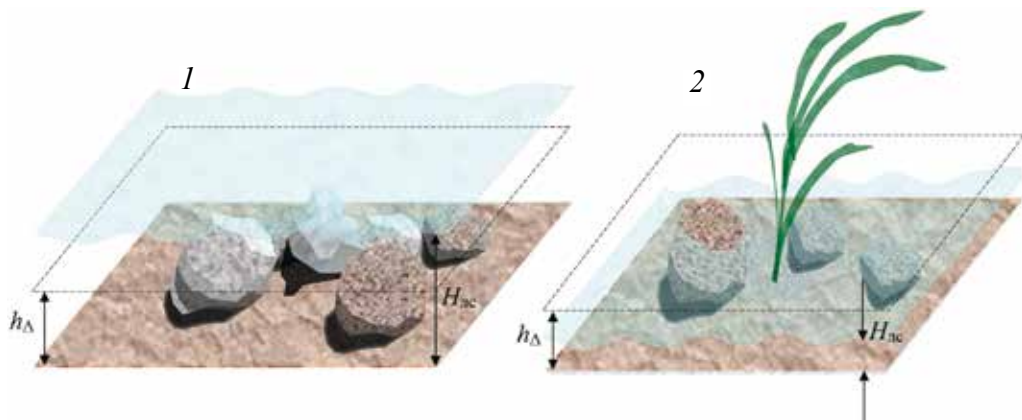


Рис. 1.15. Иллюстрация гидравлически гладких (1) и шероховатых поверхностей (2).

h_{Δ} – высота элементов шероховатости, k ; $H_{\text{лс}}$ – толщина ламинарного слоя

«эффективной» шероховатости бетона, где поверхность относительно однородна. Несколько примерных величин эффективной высоты шероховатостей приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5. Экспериментально определенные значения эффективной высоты шероховатости k по: [Chow, 1959]

Материал	k , мм
Латунь, свинец, стекло	0,03–0,9
Гальванизированная сталь	0,15–4,6
Деревянные клепки	0,18–0,9
Цемент	0,40–1,2
Бетон	0,46–3,0
Клепаная сталь	0,90–9,0
Естественное речное русло	30–900

В потоках высота шероховатости k определяется степенью ее воздействия на поток. Она изменяется не только от величины зерен отложений в русле, но и от того, как элементы шероховатости позиционируются в потоке, в каком порядке они расположены, включая наличие больших элементов шероховатости, например песчаных дюн, древесного мусора, и малых элементов шероховатости, например неоднородностей на поверхности отдельных камней. Некоторые характерные диаметры донных отложений, такие как d_{50} или d_{85}^3 , используются в качестве высоты шероховатости. Для оценки гидравлических условий среды обитания, которая объединяла бы эффект скорости и типа субстрата, введено понятие *число Рейнольдса для данной шероховатости* Re_* [Gordon et al., 2004].

Величина Re_* может быть связана с понятием «скорость касательного напряжения» v_* (м/с) и высотой шероховатости k [Френкель, 1956]:

$$Re_* = v_* \frac{k}{\nu}. \quad (1.27)$$

Скорость касательного напряжения рассчитывается по соотношению

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}, \quad (1.28)$$

где τ_0 – напряжение трения – касательная сила на единицу площади, действующая на твердую поверхность, н/м² = 1 кг/(м · с²); ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Френкель отмечает, что v_* – одна из важнейших характеристик турбулентного движения и для данного потока эта величина постоянная. Поверхность рассматривается гидравлически гладкой, если $Re_* < 5$, гидравлически

³ Диаметры, определяющие границу на гранулометрической кривой, ниже которой находится соответственно 50 или 85 % частиц, при этом d_{50} принимается за средний диаметр частиц.

шероховатой, если $Re_* > 70$. Таким образом, поток около твердых поверхностей будет турбулентным, если элементы шероховатости увеличиваются по высоте и скорость растет, приводя к тому, что ламинарный подслой становится меньше, чем высота элементов шероховатости.

Расположение объектов или организмов на речном дне может оказывать воздействие на структуру окружающего потока. Моррис [Morris, 1961] изучал проблему различного расположения элементов шероховатости в трубах. Он установил, что завихрения между элементами шероховатости создают сопротивление потоку. И расстояние между элементами шероховатости λ , и их высота k имеют значение. Моррис классифицировал поток над шероховатой поверхностью на три категории, определенные следующими условиями:

1) поток с изолированной шероховатостью (рис. 1.16, 1): вихри, которые формируются за каждым элементом, исчезают до достижения следующего элемента. Такой вид имеет место при малой величине отношения k/λ ;

2) поток с накладывающимися вихрями (рис. 1.16, 2): элементы шероховатости расположены ближе друг к другу, и вихри от элементов взаимодействуют, вызывая усиление турбулентности. Здесь высота шероховатости не так важна по сравнению с ее расположением в пространстве. Глубина потока над гребнями элементов будет ограничивать вертикальное распространение возрастающей турбулентности. Такой поток имеет место над поверхностями со значительной шероховатостью, как, например, гофрированный металл;

3) скользящий поток (рис. 1.16, 3): элементы расположены так близко друг к другу, что поток скользит над их вершинами с низкоскоростными вихрями в желобках между элементами. Поверхность действует почти как гидравлически гладкая. Такой поток имеет место при большой величине отношения k/λ .

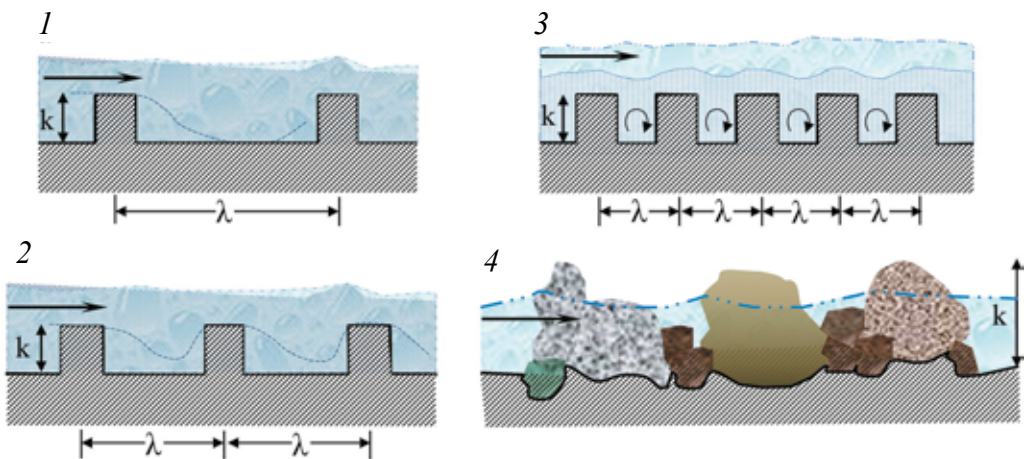


Рис. 1.16. Различные модели распределения элементов шероховатости на речном дне. Обозначения в тексте. Из: [Gordon et al., 2004]

Указанные категории применимы, когда глубина гораздо больше высоты элементов шероховатости. Девис и Бармута [Davis, Barmuta, 1989] ввели еще одну категорию для случая, когда высота элементов шероховатости превышает одну треть глубины, что встречается в реках, на которых элементы шероховатости выступают из воды;

4) поток с открытыми элементами шероховатости (рис. 1.16, 4). Структура потока становится очень сложной, так как струи воды обтекают препятствие сверху и вокруг, часто формируя аэрированный поток.

Хотя Моррис использовал элементы шероховатости одной высоты, его классификация может быть распространена на поверхности с переменной высотой. Фундаментальные исследования пространственного распределения элементов шероховатости и их влияние на поток обобщены в работе Гончарова [1962]. Пограничные слои накладываются на другие пограничные слои, и размер выбирается в зависимости от цели исследования. Внутри пограничного турбулентного слоя потока существуют свои пограничные слои на поверхности отдельных камней и раковин улиток, личинок поденки или других организмов, сидящих на камне. Статзнер и Холм [Statzner, Holm, 1989] использовали лазерный доплеровский анемометр для изучения структуры водного потока вокруг личинок поденок *Ecdyonurus* как классический случай «жизни в пограничном слое». Они считали маловероятным, что концепция пограничного слоя адекватно объяснит природу потока вокруг животных. Скорее всего, схема потоков имеет дело с морфологической структурой и/или механизмом поведения, который позволяет животным направлять сдвигающие усилия в точку, где они могут нейтрализовать их действие (например, к ногам или другим «закрепленным» придаткам). Вогель [Vogel, 1981] также отмечал, что идея поведения организмов, имеющих сглаженные формы, предположительно, чтобы сократить сопротивление и помочь им оставаться прикрепленными к поверхности, была бы резонной теорией, но чересчур упрощенной.

Структура течений может влиять на поведение организмов, закрепленных на камнях или побегах водных растений. Распределение потоков в реках играет важную роль в эволюции организмов, которые наиболее приспособлены для узкого диапазона течения. Представленные далее формулы описывают распределение скорости течения и толщины пограничных слоев вокруг некоторых идеализированных тел: острой плоской пластины, цилиндра и др.

Область ламинарного режима. Профиль скорости в ламинарном пограничном слое имеет гладкую, параболическую форму. Блазиус, студент Прандтля, нашел зависимость для описания изменения скорости с глубиной в области ламинарного стока над плоской пластиной (рис. 1.14). Хотя профиль не описывается точной формулой, в качестве аппроксимации применяется параболическое уравнение:

$$v \approx V \left(\frac{2y}{\delta_1} - \frac{y^2}{\delta_1^2} \right), \quad (1.29)$$

где v – скорость на расстоянии X вдоль пластины и некотором расстоянии y над этой точкой; V – скорость свободного потока, м/с; y – расстояние от поверхности пластины, м; $\delta_{\text{лам}}$ – толщина ламинарного пограничного слоя на расстоянии X вдоль пластины.

Так как в действительности нет верхнего предела для профиля скорости (т.е. эффект замедления стока продолжается на большом расстоянии), было выбрано произвольное ограничение, в котором этот эффект считается незначительным. Блазиус предположил, что граница пограничного слоя находится в точке $v = 0,99V$, и предложил уравнение для толщины пограничного слоя:

$$\delta_{\text{лам}} = 5,0 \frac{X}{\sqrt{Re_x}}, \quad (1.30)$$

где X – расстояние от начала пластины; Re_x – «локальное число Рейнольдса», рассчитанное по уравнению (1.26).

Как было установлено, решение Блазиуса хорошо соответствует экспериментальным данным [Gordon et al., 2004].

Область турбулентного режима. Профиль скорости для гидравлически гладких или шероховатых поверхностей обычно хорошо описывается логарифмическим уравнением. Прандтль вывел его для описания турбулентного профиля скорости исходя из предположений, что частицы жидкости «моли» обмениваются моментом скорости (повышая или понижая скорость остальных) на протяжении некоторой «длины смещения». Уравнение имеет вид:

$$\frac{v}{v_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{yv_*}{v} + B, \quad (1.31)$$

где v – скорость (м/с) на расстоянии y (м) от поверхности; v_* – скорость касательного напряжения (м/с), описанная уравнением (1.28).

Таким образом, выражения с обеих сторон уравнения (1.31) являются безразмерными. Эмпирические коэффициенты k и B изменяются в зависимости от типа, концентрации и размеров шероховатости и формы трубы или русла. Уравнение (1.31) обычно связывают и с Прандтлем, и с фон Карманом (студентом Прандтля) и коэффициент k иногда называют универсальной постоянной Кармана. Из опытов установлено, что величина k существенно варьирует при среднем ее значении около 0,40 [Gordon et al., 2004]. Для гидравлически гладких границ (и при замене натурального логарифма на десятичный) уравнение (1.31) принимает вид:

$$\frac{v}{v_*} = 5,75 \log \frac{yv_*}{v} + 5,5. \quad (1.32)$$

На практике коэффициенты $1/k$ и B могут несколько отличаться от значений 5,75 и 5,5 соответственно. Для гидравлически шероховатых условий уравнение для распределения скорости обычно представляется в следующем виде:

$$\frac{v}{v_*} = 5,75 \log \frac{y}{k} + 8,5 \text{ или } \frac{v}{v_*} = 5,75 \log \frac{30y}{k}, \quad (1.33)$$

где k – мера шероховатости (размер частиц отложений).

Уравнение (1.33) приводится в двух формах; во втором варианте константа 8,5 вносится под знак логарифма. Профиль скорости обычно предполагается применять для $y = 0,5 k$, т.е. для глубины, равной половине высоты шероховатости. Если производятся непосредственные измерения скорости, уравнение следует подогнать под измеренный профиль с тем, чтобы рассчитать скорость v_* [см. уравнение (1.28)].

Для гладкой плоской пластины (или подобных объектов) пограничный турбулентный слой может быть описан степенным уравнением с показателем n в диапазоне от 0,15 до 0,10 при $Re = 2600 \div 3240 \cdot 10^3$ [Френкель, 1956]. Вайт [White, 1999] применил эту зависимость с числом Рейнольдса между 10^5 и 10^7 и $n = 1/7$:

$$v \approx V \left(\frac{y}{\delta_{\text{турб}}} \right)^{1/7}, \quad (1.34)$$

где V – скорость свободного потока, или максимальная скорость по Френкелю, м/с; $\delta_{\text{турб}}$ – толщина пограничного турбулентного слоя, определяемая по уравнению

$$\delta_{\text{турб}} = 0,37 \frac{x}{Re_x^{1/5}}. \quad (1.35)$$

Здесь y – расстояние от поверхности; X – расстояние от переднего ребра плоской пластины (рис. 1.14). Сравнивая уравнения (1.30) и (1.35), можно показать, что пограничный турбулентный слой растет вдоль пластины быстрее, чем ламинарный слой.

Вязкий подслей. Важным фактором условий обитания организмов, живущих на погруженных в воду листьях, камнях, поваленных деревьях и т.п., является толщина ламинарного, или вязкого, подслоя, который существует, когда поверхность предметов является гидравлически гладкой. При моделировании турбулентного профиля скорости логарифмической функцией существует проблема в точке, в которой кривая достигает твердой поверхности ($y = 0$), так как логарифм нулевых значений не существует. Для этого случая Прандтль использовал линейный профиль скорости около твердой поверхности, чтобы «состыковать» с ней логарифмическое приближение. Эта область, предположительно, является областью ламинарного стока, в которой влияние вязкости увеличивается.

Профиль скорости в этой области описывается уравнением

$$\frac{v}{v_*} = \frac{y v_*}{v}, \quad (1.36)$$

где переменные определены ранее.

Толщина ламинарного подслоя $\delta_{\text{лпс}}$ определяется точкой, в которой логарифмический и линейный профили пересекаются, и часто дается формулой

$$\delta_{\text{лпс}} = 11,8 \frac{v}{v_*}. \quad (1.37)$$

Общепринято, что речные беспозвоночные, селящиеся на донном субстрате, в среде с высокими скоростями течения имеют уплощенные формы тела, которые позволяют им вести «защищенную» жизнь в ламинарном подслое. Смит [Smith, 1976] использовал уравнение (1.37) и предположение, что средняя скорость потока в 20 раз больше скорости касательного напряжения, чтобы рассчитать толщины ламинарного подслоя (для температуры воды 15 °C). Из своих расчетов он сделал вывод, что при обычной средней скорости в реке представляется маловероятным, что большие беспозвоночные могут рассматриваться, как нашедшие убежище в ламинарном подслое.

Средняя скорость, v (м/с)	Толщина подслоя, $\delta_{\text{лпс}}$ (мм)
0,01	27
0,005	5,4
0,10	2,7
0,50	0,54
1,00	0,27

В действительности их присутствие может быть причиной шероховатости поверхности, в этом случае ламинарный подслон не существует [Davis, Barmuta, 1989]. Более вероятно, что эти организмы имеют уплощенные формы тела по другим причинам, например для облегчения перемещения между камнями, которые дают им укрытие от течения.

Форма профиля скорости, особенно в области близкой к твердой поверхности, будет отражать величину касательных напряжений близ погруженных в воду предметов. Из уравнения (1.22) видно, что касательные напряжения связаны с крутизной профиля скорости. Обратимся к рис. 1.14 снова. Здесь толщина пограничного слоя растет с расстоянием вдоль пластины. У пластины скорость нулевая, а на внешней границе пограничного слоя скорость почти равна скорости свободного потока. Так как пограничный слой утолщается, эта разница в скорости «растягивается» на большее расстояние, и градиент скорости (отношение dv к dn) понижается. Таким образом, касательные напряжения сокращаются по мере удаления от передней границы со скачком в области перехода от ламинарного к турбулентному потоку.

Сумма касательных напряжений на поверхности может дать величину общей силы сдвига. Она является также силой «поверхностного трения», обозначаемой $F_{\text{пов}}$. Для одной стороны пластины она равна:

$$F_{\text{пов}} = C_f W L \rho \left(\frac{v^2}{2} \right), \quad (1.38)$$

где C_f – коэффициент поверхностного трения, который зависит от типа течения (ламинарного или турбулентного); W и L – ширина и длина пластины соответственно; ρ – плотность; v – скорость потока.

Чтобы рассчитать общее сопротивление на обеих сторонах пластины (или, например, на обеих сторонах рыбы), число 2 из знаменателя в уравнении (1.38) следует удалить. Для рыбы, плывущей в потоке, величина $F_{\text{пов}}$ может представлять силу, которую она должна приложить, чтобы поддержать некоторую скорость. Для объекта на дне, такого как плоский камень, промокшие листья или бентосные беспозвоночные, эта величина обозначает сопротивление потоку и, таким образом, связана с вероятностью, что они будут унесены течением.

Организмы, живущие на дне реки, должны балансировать между выгодой нахождения в более тонком пограничном слое (увеличение перемешивания, поступление питания и воздуха, удаление отходов) с увеличенным касательным напряжением и проблемами остаться прикрепленными. Микробы или питающиеся взвесью организмы, расположенные в более тонком пограничном слое, на передней границе плоской пластины, например, имели бы лучшие условия для поступления питания и воздуха, чем в утолщающемся далее слое, и касательные напряжения должны были бы быть выше (рис. 1.14).

В ламинарном потоке местные касательные напряжения τ_0 выражаются формулой

$$\tau_0 = 0,332 \mu v \left(\frac{Re^{1/2}}{X} \right), \quad (1.39)$$

где τ_0 – в н/м²; μ – вязкость жидкости; v – скорость потока; Re – число Рейнольдса; X – расстояние от начала пластины.

Это уравнение может быть использовано для получения значений местного касательного напряжения в любой точке ламинарной области вдоль пластины. Сила поверхностного трения, или сила лобового сопротивления, $F_{\text{пов}}$ рассчитывается по уравнению (1.38), где коэффициент C_f находится из формулы

$$C_f = \frac{1,33}{Re_x^{1/2}}. \quad (1.40)$$

Здесь Re_x – число Рейнольдса, в котором «характеристическая длина» L есть длина пластины, измеренная в направлении потока.

В турбулентной области из-за пульсаций скорости касательные напряжения имеют большой размах, что может быть рассчитано из средней скорости

потока. Касательные напряжения, вызванные турбулентностью, называются мнимыми касательными напряжениями Рейнольдса. При условии, что турбулентный пограничный слой начинается у переднего ребра пластины, могут быть даны уравнения для касательных напряжений и поверхностного гидродинамического сопротивления вследствие трения. Касательные напряжения у твердой поверхности τ_0 даются как

$$\tau_0 = \rho c_f \left(\frac{v^2}{2} \right), \quad (1.41)$$

где c_f – «местный коэффициент поверхностного трения или сопротивления» на расстоянии X от переднего ребра. Для гидравлически гладких поверхностей

$$c_f = \frac{0,058}{Re_x^{1/5}}. \quad (1.42)$$

Гидродинамическое сопротивление равно сумме касательных напряжений над пластиной. При гидравлически гладкой поверхности (и для одной стороны пластины) это выражается уравнением (1.38) со значением

$$C_f = \frac{0,074}{Re_x^{1/5}}. \quad (1.43)$$

Как и в уравнении (1.40), Re_x – число Рейнольдса для соответствующей длины пластины.

Для высоких чисел Рейнольдса требуется более тщательный анализ. Сопоставление уравнений (1.40) и (1.43) показывает, что распространение ламинарного пограничного слоя вдоль пластины будет сокращать гидродинамическое сопротивление.

Если на гладкой пластине появятся наросты или же по другим причинам она может рассматриваться как гидравлически шероховатая, коэффициент сопротивления связывается с относительной шероховатостью. Вайт [White, 1999] дает эти уравнения для коэффициентов сопротивления для полностью шероховатого режима:

$$c_f = \left(2,87 + 1,58 \log \frac{X}{k} \right)^{-2,5} \quad (1.44)$$

и

$$C_f = \left(1,89 + 1,62 \log \frac{L}{k} \right)^{-2,5}, \quad (1.45)$$

где k – мера шероховатости, м; другие переменные определены ранее.

Для перехода из ламинарного режима в турбулентный ($500\,000 < Re_L < 10^7$) пограничный слой будет ламинарным вдоль верхней части пластины. Прандтль

вывел следующее «гибридное» уравнение для области перехода по: [Streeter, Wylie, 1979]:

$$C_f = \frac{0,074}{Re_L^{1/5}} - \frac{1700}{Re_L}. \quad (1.46)$$

Вокруг плохо обтекаемого водным потоком тела (например, цилиндр, пластина, перпендикулярная потоку и т.п.) скорости и давления на противоположных его сторонах существенно различны, при этом образуется сила, перпендикулярная набегающему потоку (подъемная), и/или сила против направления потока (сопротивление). Отметим, что, если бы вязкость не существовала, сопротивления бы не было, и плавающее тело, например обломок дерева, осталось бы на том месте, где его бросили, а не плыло бы вниз по течению.

Вязкие жидкости «липнут» к твердым предметам и теряют энергию на внутреннее трение. На передней границе погруженного в воду тела поток разделяется, обтекая объект, линии тока образуют *точку расщепления* (с нулевой скоростью). Здесь начинается развитие пограничного слоя на разных сторонах объекта (рис. 1.14). По мере продвижения жидкости вдоль тела она теряет энергию на трение и пограничный слой утолщается. Это аналогично перегруженному дорожному движению, когда одна машина (частица в нашем случае) по какой-то причине останавливается на полосе, следующие сзади машины (частицы) также останавливаются или пытаются обойти вокруг «застывшую» машину (частицу), занимая свободные полосы и обочины. Таким образом, поверхность пограничного слоя отодвигается от твердой поверхности, частицы выносятся в свободный поток. За телом остается «разрыв», и частицы привлекаются в эту область, образуют обратный поток или вихрь. В этой области, называемой турбулентным следом, происходит интенсивная турбулентность и диссипация (рассеяние) энергии.

В пределах турбулентного следа сразу за предметом имеет место медленное обратное течение – *застойная зона*. Для объектов цилиндрической формы эмпирически показано, что длина застойной зоны примерно равна половине длины погруженного тела. Область застоя с нулевыми скоростями может образовываться и перед объектом: например, перед широкими опорами мостов, упавшими деревьями. В таких местах многие водные особи находят убежище от сильного течения. Так, при изучении колонии диатомовых водорослей на стеклянных дисках, погруженных в поток, Корте и Блинн [Korte, Blinn, 1983] обнаружили увеличение колонизации на границах дисков и отнесли это к задержанию (перехвату) подверженных дрейфу организмов лицевой частью и присутствием микровихрей ниже по течению.

Несмотря на то что расчет точки разделения потока не может быть выполнен математически, она легко опознается при наблюдениях. Точка разделения зависит от формы и шероховатости тела и свойств пограничного слоя, включая

турбулентный или ламинарный сток. Разделение потока имеет тенденцию находиться у острых неровностей на поверхности предметов. В потоках это случается не только вокруг объектов с плохо обтекаемой формой, как, например, выходы горных пород, но также на границах потока, где он внезапно расширяется на нижней стороне изгиба.

Вихревые области за объектом меняют как свою структуру, так и скорость движения потока. Используя пример цилиндра, расщепление не происходит при числах Рейнольдса ниже 5 (значение числа не определено точно), так как эффект высокой вязкости задерживает движение вихрей. Здесь почти все давление осуществляется поверхностным трением. Выше $Re \approx 5$ начинается формирование вихрей вначале за предметом. Ниже цилиндра поток начинает колебаться синусоидально. При увеличении скорости потока неизбежно один вихрь будет расти быстрее, чем другой, до тех пор, пока наибольший вихрь будет выброшен в поток, и ниже по течению [Френкель, 1956].

Наряду с законами сохранения энергии и массы жидкости поток должен удовлетворять *закону сохранения напряженности турбулентности*. Это означает, что циркуляция, созданная в одном месте, должна быть сбалансирована равной по величине и противоположной по направлению в другом месте [Vogel, 1981]. Таким образом, вихри (водовороты) выталкиваются с другой стороны объекта, и каждый вращается в разных направлениях по отношению к предыдущему. Этот тип турбулентной струи с альтернативными вихрями называется «дорожка Кармана» по имени известного инженера Кармана, который дал ей теоретическое объяснение в 1912 г. (рис. 1.17). Темные области красного оттенка соответствуют большим скоростям потока, светлые – более низким. Сразу за цилиндром наблюдается обратное течение – *застойная зона*. Перед цилиндром находится область нулевых скоростей (показана синим оттенком) (рис. 1.17). Картина вихрей вокруг цилиндра описывается как неустановившийся ламинарный поток с числами Рейнольдса ниже 10^5 [с диаметром цилиндра в качестве характерной длины в уравнении (1.24)]. Когда значение



Рис. 1.17. Вихревая дорожка Кармана. Фото с сайта http://azagoskin.ru/wp-content/uploads/2015/01/plot_XY_reedit.png

Re находится между 100 000 и 250 000, поток становится турбулентным. В турбулентном пограничном слое частицы жидкости около твердой поверхности имеют большие скорости, поэтому они будут продвигаться дальше вокруг цилиндра до тех пор, пока не произойдет разделение. След сужается и гидродинамическое давление сокращается в районе критического числа Рейнольдса, когда происходит переход из ламинарной в турбулентную область.

Вихревая дорожка оказывает ритмические боковые воздействия на цилиндр. Если они совпадут с частотой собственных колебаний твердого тела, может произойти резонанс, который дает, к примеру, появление «пения» проводов на ветру. Исследователь, опускающий гидрометрическую штангу в быстро текущий поток, при измерении скорости течения или глубины чувствует вибрацию, вызванную вихревой дорожкой. Частота колебаний описывается числом Струхала (St), названным по имени физика, который экспериментировал с «поющими» проводами в 1878 г.:

$$St = \frac{\eta d}{V}, \quad (1.47)$$

где η – частота вихреобразования с одной стороны цилиндра, Гц (число колебаний в секунду); d – диаметр цилиндра, м; V – скорость свободного потока, м/с. St является функцией числа Рейнольдса для характерной длины d .

Вихреобразование происходит в диапазоне $10^2 < Re < 10^7$. Зависимость St от Re приводится во многих учебниках по гидромеханике. Средняя величина St равна около 0,21 [White, 1999].

Давление на погруженные в воду тела (дополнительно к гидростатическому) состоит из двух частей: давление из-за поверхностного трения, как описано выше для плоской пластины, и давление на поверхность объекта, называемое лобовым сопротивлением. Это сопротивление зависит от формы тела и больше для тел с большим поперечным сечением. Данный вид сопротивления у плохобтекаемых тел в значительной степени формируется из-за расщепления потока и разности давлений между внешней и тыльной частями [Гончаров, 1962; Gordon et al., 2004]. Если, например, плоская острая пластина на рис. 1.14 была бы повернута поперек течения, следовало бы интуитивно ожидать значительного увеличения гидродинамического давления. При этом сила (давление) поверхностного трения существенно сокращается, так как оно действует только на острые ребра. Таким образом, давление на тело целиком определяется лобовым сопротивлением, зависит от его формы и рассчитывается из соотношения

$$F_D = C_D A_p \rho \frac{V^2}{2}, \quad (1.48)$$

где A_p – площадь поперечного сечения пластины; V и ρ – скорость свободного потока и плотность жидкости соответственно; C_D – коэффициент сопротивления.

Уравнение (1.48) применяется для всех погруженных в движущийся поток тел, и F_D представляет собой общее давление (гидродинамическое давление плюс давление поверхностного трения), A_p есть проекция объекта, на которую воздействует поток. Величины A_p для различных форм приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6. Проекция площади A_p для различных форм (d – диаметр)
по: [Gordon et al., 2004]

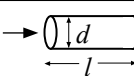
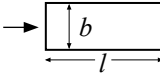
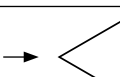
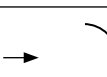
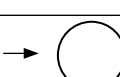
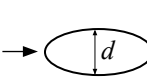
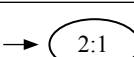
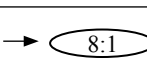
Тип объекта	A_p
Пластина, перпендикулярная потоку	Длина $\times$ ширина
Пластина параллельная потоку	0
Перпендикулярный потоку цилиндр	$d \times$ длина цилиндра
Параллельный потоку цилиндр	$\pi d^2/4$
Сфера	$\pi d^2/4$

Другие «факторы площади» могут быть использованы взамен проекции площади, такие как «смоченная площадь», которая представляет собой общую поверхность, повернутую к потоку (используется для обтекаемых тел). Коэффициент сопротивления C_D обычно определяется экспериментально на моделях в аэродинамических трубах, гидравлических лотках и бассейнах. Он изменяется в зависимости от числа Рейнольдса, базирующегося на некоторых характерных размерах объекта, т.е. длины или диаметра. Проекция площади, использованная в уравнении (1.48), должна соответствовать площади, использованной при экспериментальном определении C_D . C_D относительно постоянно для угловатых тел при числах Рейнольдса выше 10^4 . Созданы таблицы значений C_D для чисел $Re = 10^4$ и более; выдержки из них приведены в табл. 1.7. Двухмерные коэффициенты используются для объектов подобно гидрометрической штанге цилиндрической формы или квадратного сечения, которые сохраняют свою форму на большую длину. Когда личинка веснянки, близкая к цилиндрической форме, ориентируется в потоке, это напоминает цилиндр вдоль потока, когда она поворачивается боками к потоку – это больше похоже на двухмерный круглый цилиндр. Камбала может лучше всего моделироваться трехмерным плоским эллипсоидом.

Свободное падение является общим для парашютирующих детенышей пауков, разносимых по ветру семян, падающих капель и оседающих частиц наносов. Объект будет вначале ускоренно снижаться вследствие действия силы тяжести. Однако по мере увеличения скорости лобовое сопротивление также увеличивается, пока не достигнет уровня, при котором все внешние силы придут в равновесие. В этой точке ускорение равно $0^{(4)}$. При этом скорость падения будет постоянной, называемой *предельной (конечной) скоростью*. Предельная

⁴ По второму закону Ньютона, если чистая сила F равна 0 и масса m та же самая, тогда в уравнении $F = ma$ ускорение (a) должно быть равно 0.

Таблица 1.7. Значения коэффициента лобового сопротивления C_D погруженных в воду тел различной формы при $Re > 104$ по: [White, 1999; Robertson, Crowe, 1990]

Плоские модели			Объемные модели		
Форма		C_D	Форма		C_D
	Пластина поперек течения	1,98		Цилиндр $l/d = 0$ $l/d = 1$ $l/d = 8$	1,17 0,90 0,99
	По течению $l/b = 1$ $l/b = 5$ $l/b = 20$	1,18 1,20 1,50		Конус 60°	0,50
	Равносторонний треугольник	1,60		Чашка верхом к течению	1,40
	Половинка трубы	2,30		Сфера	0,47/0,20
	Цилиндр	1,20/0,30		Эллипсоид $l/d = 0,75$ $l/d = 2$ $l/d = 8$	0,50/0,20 0,27/0,13 0,20/0,08
	Эллиптический цилиндр с соотношением длин осей	0,60/0,20			
		0,25/0,10			

Примечание. В числителе – значения для ламинарного, в знаменателе – для турбулентного режима.

скорость зависит от размера, формы и плотности объекта так же, как и свойств среды, которые должны оставаться постоянными по пути падения. Человеческое тело во время падения в атмосфере имеет предельную скорость порядка 56 м/с (200 км/ч). В 1845 г. Стокс вывел зависимость для предельной скорости сферы при очень низких числах Рейнольдса в диапазоне $Re < 0,1$ (с рассчитанным Re , используя диаметр частиц). В этом диапазоне коэффициент сопротивления изменяется линейно с Re и выражается соотношением

$$C_D = \frac{24}{Re}. \quad (1.49)$$

По закону Стокса предельная скорость оседания для сферы в воде рассчитывается по формуле

$$V = 2g \frac{r^2 (\rho_s - \rho)}{9\mu}, \quad (1.50)$$

где g – ускорение силы тяжести; r – радиус сферы; ρ – плотность жидкости; ρ_s – плотность сферы; μ – вязкость жидкости. Так как уравнение может быть

использовано для определения времени оседания частиц, оно является основой для анализа размера частиц почвы пипеточным методом.

Предполагая, что пузырьки воздуха в воде имеют сферическую форму, то же уравнение может быть применено для определения скорости всплывания пузырьков к поверхности воды (хотя реально пузырьки несколько уплощены). В воде этот закон не может быть применен к частицам мельче, чем 0,0002 мм, так как оседание частиц столь малого размера уже находится под влиянием Броуновского движения. Для условий с высокими значениями Re , где важны эффекты инерции и C_D не связано линейно с Re , расчет предельной скорости определяется путем подбора [Robertson, Crowe, 1990]. Дополнительные сложности появляются для дискообразных объектов, так как они испытывают колебательные движения во время оседания, что делает величину C_D неопределенной [Smith, 1976]. Другие ограничения закона Стокса включают предположение, что оседающая частица находится в изоляции. Если концентрация частиц высока, то предельная скорость сокращается. Слипание мелких частиц и образование хлопьев (коагуляция) также увеличивают скорость оседания по сравнению с рассчитанной, поэтому при анализе размеров частиц используется дисперсант, раздробляющий комки и хлопья. Для противоположного эффекта, т.е. образование хлопьев при очистке воды на очистных сооружениях, добавляются квасцы (сульфат алюминия).

В медленно текущих реках большинство организмов находят способы сокращать лобовое сопротивление своего тела и таким образом уменьшать количество энергии, необходимое для движения против течения, или поддерживать свое положение на течении. В отличие от неодушевленных предметов, водные организмы имеют возможность менять свою ориентацию относительно направления течения. Вогель [Vogel, 1981] дает пример морских брюхоногих моллюсков, которые выравнивают длинные оси своих тел вдоль морских водорослей, к которым они прикреплены. Затем, когда лист морской водоросли изменяет свою ориентацию вследствие приливного течения, моллюски тоже ориентируются в нужном направлении, чтобы сократить лобовое сопротивление. Некоторые донные организмы расплющиваются по субстрату, другие – становятся гладкими, принимая обтекаемый облик, или имеют придатки, которые уменьшают лобовое сопротивление.

В отличие от жестких «плохо обтекаемых тел», рассмотренных ранее, большинство организмов более гибки. Движение организмов сильнее изменяет лобовое сопротивление по сравнению с рассчитанным сопротивлением по форме их поперечного сечения. Сложная гидродинамика взаимодействия водных растений и живых организмов со структурой потока – передовая область исследований. Вебб [Webb, 1984] исследовал процесс плавания рыбы, описывая различные формы тела, специально адаптированные для ускорения движения, маневрирования и длительного плавания. При высоких значениях

числа Рейнольдса более вероятно, что будут встречаться личинки насекомых, пресноводных моллюсков, для которых гидродинамическое давление гораздо важнее, чем вязкое трение. Факторами, затрагивающими лобовое сопротивление при высоких Re , будут форма объекта, его ориентация в потоке и изменение размера турбулентного следа за телом. Мауде и Вильямс [Maude, Williams, 1983] определили, что когда пресноводные раки попадали в усиливающийся поток, они прижимали свои тела к субстрату и создавали профиль «плуга», складывая свои передние клешни вместе, позволяя таким образом поддерживать свое положение на дне.

Классический пример стимулирования турбулентности на своей поверхности с тем, чтобы сократить размер волнового турбулентного следа и сопротивление, это мяч для гольфа, имеющий специальные ямки на своей поверхности. Один из видов скумбрии (касторовомасляная рыба, *Ruvettus*) имеет конструкции на своей коже, которые впрыскивают жидкость в пограничный слой с тем, чтобы сократить сопротивление [Bone, Marshall, 1995]. Организмы используют подъемные силы и сопротивление, чтобы перемещаться горизонтально или вертикально, или оставаться на месте при минимуме усилий. Подъемная сила появляется из-за разности давлений выше и ниже объекта (рис. 1.11). Величина подъемной силы рассчитывается, подобно силе лобового сопротивления, суммированием разницы давлений над и под действующей поверхностью. Действительно, уравнение, описывающее подъемную силу, очень похоже на уравнение (1.48) для лобового сопротивления:

$$F_L = C_L A_p \rho \frac{V^2}{2}, \quad (1.51)$$

где A_p – для крыла представляет собой «площадь продольного сечения» (как показано на рис. 1.11); ρ и V – плотность воздуха (воды) и скорость движения; C_L – коэффициент подъемной силы, определяемый экспериментально. Для крыльев принято также использовать площадь продольного сечения при расчете силы лобового сопротивления из-за относительно высокого сопротивления поверхностного трения.

1.1.3. Элементы речной гидравлики

Движение воды в естественных руслах гораздо сложнее, чем в трубах и лотках лабораторий. Вместе с тем практически все законы и уравнения гидромеханики, обнаруженные в искусственных потоках, присущи и потокам воды в естественных руслах с поправками на «не идеальные» условия. Перечислим основные характеристики руслового потока, которые находят применение в гидравлических формулах.

Глубина (h). Расстояние между водной поверхностью и дном на одной вертикали.

Уровень воды (H). Расстояние по вертикали от постоянной плоскости сравнения до водной поверхности. Плоскость сравнения располагается ниже самой низкой точки водного сечения и обычно «привязывается» к уровню моря (в Российской Федерации к «0» Балтийского футштока) геодезическими методами (раздел 1.4.1).

Расход воды (Q). Объем воды, протекающий через поперечное сечение в единицу времени.

Ширина реки (B). Ширина потока на уровне водной поверхности. В отличие от каналов с вертикальными стенками ширина потока изменяется с глубиной.

Площадь поперечного сечения (ω). Площадь потока в определенном поперечном сечении реки. Часто вместо него применяется термин «живое» сечение реки, оно отличается от общей площади поперечного сечения отсутствием областей с нулевым или обратным течением (часто встречается вдоль извилистых границ берегов рек – любимых мест отдыха мигрирующих вверх по течению рыб).

Уклон свободной водной поверхности (i или I). Отношение перепада высот водной поверхности к расстоянию между двумя створами, обычно на прямолинейном участке со спокойным течением и без притоков. При равномерном потоке i равен уклону дна.

Смоченный периметр (χ). Длина границ поперечного водного сечения на контакте воды с дном и берегами.

Гидравлический радиус (R). Отношение площади поперечного сечения к смоченному периметру:

$$R = \frac{\omega}{\chi}. \quad (1.52)$$

Средняя глубина (h). – отношение площади поперечного сечения к ширине реки:

$$h = \frac{\omega}{B}. \quad (1.53)$$

На широких реках (при отношении к своей глубине более 20:1) гидравлический радиус R практически равен средней глубине реки h .

Виды движения. Изучение характеристик водного потока со свободной водной поверхностью (продольного и поперечного профилей водной поверхности, напряжения трения, скорости течения, расхода воды и некоторых других) выполняется в рамках *гидравлики открытых русел*. Здесь влияние вязкости не так важно, как сил тяжести и инерции, заставляющих воду двигаться или тормозиться. Вертикальное распределение скорости зависит от уклона и формы русла, размера элементов шероховатости. Движение воды в открытых естественных руслах преимущественно турбулентное, визуально проявляется

в виде неоднородности водной поверхности, водоворотов и других проявлений, турбулентность в виде малых и больших вихрей имеет место по всей глубине потока. В сравнении с потоком в трубах в открытых руслах поверхность воды находится под воздействием атмосферного давления. Так как форма поперечного сечения часто имеет неправильную форму, которая к тому же меняется по длине реки, появляется много сложных проблем. Однако многие формулы для описания движения воды в трубах с успехом применяются для естественных речных русел.

Как отмечалось выше, поток в открытых руслах может быть: установившимся или неустановившимся; равномерным (однородным) или неравномерным (неоднородным); ламинарным или турбулентным; спокойным (докритическим), критическим или бурным (послекритическим). Равномерный поток в естественных реках редок по сравнению, например, с профилированными каналами. Однако часто полагают, что поток на длинных и прямых отрезках равнинных русел с постоянным уклоном и поперечным сечением равномерный. В этих условиях можно применять уравнения для равномерного потока. Хотя области ламинарного стока могут существовать около поверхностей камней или организмов, естественный поток в реках почти всегда турбулентный, за исключением, возможно, редких случаев, когда вода течет медленно в виде тонкой пленки в несколько миллиметров в густой траве на пологих склонах [Бефани, 1977; Маккавеев, Чалов, 1986].

Типы движения воды: *спокойный*, *критический* или *бурный* режимы связаны с соотношением скорости и глубины и описываются разными формулами. Из уравнения неразрывности следует, что средняя скорость через любое поперечное сечение выражается как расход ($\text{м}^3/\text{с}$), деленный на площадь поперечного сечения (м^2), т.е.

$$V = \frac{Q}{\omega}. \quad (1.54)$$

Скорость потока имеет тенденцию увеличиваться с ростом уклона и снижением шероховатости русла. В экстремальных случаях водопада, где уклон максимален и «шероховатости русла» не существует, скорости могут достигать 8,1 м/с [Hynes, 1970]. Скорости течения воды в естественных руслах намного ниже этой величины. С практической точки зрения скорости порядка 0,1 м/с на глаз едва заметны, в то время как скорости около 3,0 м/с не позволяют стоять даже по колено в воде. Из-за сопротивления сил трения сток снижается у дна и берегов и немного у водной поверхности. Наряду с турбулентностью потока это сопротивление влияет на изменение в распределении скоростей во времени, с глубиной, в поперечном сечении и продольно по реке.

Скорости меняются при изменении уклона и уровня воды в реке. В целом скорости будут расти сильнее, где сопротивление наименьшее, т.е. на середине реки. Даже во время паводков низкоскоростные области будут сохраняться

у краев потока. Зависимость скорости и расхода от уровня лежит в основе подсчета стока воды в русле. Если скорости измеряются на вертикали, график измеренных скоростей в зависимости от глубины иллюстрирует вертикальный профиль скорости. От нулевой скорости у дна скорость увеличивается вначале быстро, а затем выравнивается после достижения своей максимальной величины. Форма русла, шероховатость дна и интенсивность турбулентности – все это влияет на профиль скорости.

Типичный профиль скорости имеет тенденцию максимума несколько ниже водной поверхности, так как существует сопротивление воздуха. В центре широкой и быстрой реки максимум скорости располагается близ свободной поверхности. При наличии ледового покрова максимум скоростей перемещается ниже по глубине. Когда высота камней, булыжников, растений, упавших деревьев, песчаных дюн и других «элементов шероховатости» велика по сравнению с глубиной потока, скорости течения между этими элементами могут отличаться существенно от скоростей над этими выступами. Для математического описания вертикального профиля скорости часто применяется логарифмическая функция (рис. 1.18).

Если скорость изменяется с глубиной по логарифмическому закону, то средняя величина скорости v_{cp} находится примерно на высоте 0,4 глубины, измеренной от дна. Для средней скорости на вертикали уравнение (1.33) для гидравлически шероховатых условий будет

$$v_{cp} = 5,75V_* \log \frac{12,3R}{k}, \quad (1.55)$$

из которого может быть вычислена скорость трения V_* , если средняя скорость v_{cp} , гидравлический радиус R и относительная шероховатость k/R известны. Смит [Smith, 1976] отмечает, что величина относительной шероховатости k/R

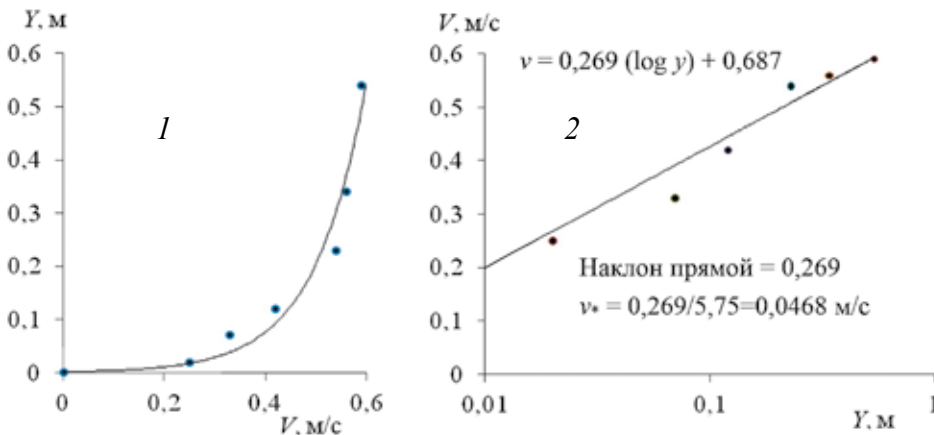


Рис. 1.18. Зависимость скорости потока от глубины у твердой поверхности (1), (2) – то же в полулогарифмическом масштабе. Из: [Gordon et al., 2004]

изменяется от более чем 0,2 для мелких потоков, текущих по одному руслу, до менее чем 0,0002 для глубоких потоков с глинистым дном. Используя информацию, представленную на рис. 1.18, можно обратным расчетом вычислить величину k из уравнения (1.55), используя среднюю глубину реки для аппроксимации R . Это дает $k \approx 0,09$ м и $k/R \approx 0,17$. Данный профиль был измерен на тальвеге реки, где средний размер донных отложений был порядка 100 мм (0,1 м), что вполне соответствует рассчитанной величине k [Gordon et al., 2004]. Другие уравнения, описывающие профиль скоростей, были разработаны для различных неправильных форм русел по данным о размере частиц отложений [Караушев, 1969].

Линии, объединяющие точки с равными скоростями (изотакхи), могут быть нанесены на разрез реки подобно тому, как изолинии отметок рельефа наносятся на топографическую карту. Там, где изотакхи сгущаются, высок скоростной градиент, а также напряжение трения. На изгибе реки изотакхи сгущаются у внешнего берега, где основной поток ускоряется за счет центробежных сил. Структура изменения скорости на участке реки тоже может быть отражена на графике, если скорости (поверхностные или средние) наносятся по ряду поперечных сечений, что дает возможность иллюстрировать, насколько хорошо участок соответствует условиям равномерного стока, или выявить, например, площади с высоким потенциалом эрозии берегов или хороших условий обитания рыб. Можно показать такие особенности местообитания, как защищенные области рядом с областями высоких скоростей потока, что требуется, например, для лососевых [Maddock, 1999].

Для полного описания распределения скоростей в реках не следует оставлять без внимания спиральные, винтовые и вторичные течения. Спиральные течения часто появляются на изгибе русла реки и служат следствием проявления центробежных сил и сил сопротивления. На повороте реки поток отбрасывается к внешним берегам, вызывая здесь повышение уровня воды. Это создает градиент, заставляющий поток двигаться по дну от внешнего к внутреннему берегу. Спиральное движение генерируется поперек общего направления потока.

Удельная энергия сечения. Рассмотренное ранее уравнение Бернулли (1.17)

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + h_f$$

описывает распределение энергии вдоль равномерного речного потока с учетом всех сил сопротивления. В этом трехкомпонентном уравнении все члены имеют размерность длины и называются напорами (высотным напором, напором давления и скоростным напором). Член, характеризующий потерю напора h_f , приходится на потерю энергии из-за трения, турбулентности и других причин. Разработаны эмпирические формулы для расчета потерь напора,

которые принимают во внимание вязкость жидкости и влияние шероховатости поверхности русла [Чертоусов, 1957; Караушев, 1969]. Потери напора могут происходить также из-за таких местных эффектов, как гидравлические прыжки (из-за внезапных изменений уклона, расширений или конструкций на пути водного потока), или быстрых изменений в направлении потока на поворотах реки.

Средняя удельная энергия в любом поперечном сечении относительно плоскости сравнения $O-O$ (рис. 1.19) согласно уравнению Бернулли (1.17) будет:

$$E = z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g}, \quad (1.56)$$

где z – превышение некоторой точки (точка A , рис. 1.19) над плоскостью сравнения $O-O$; P – гидростатическое давление в этой точке; V – средняя скорость в сечении.

В соответствии с основным уравнением гидростатики $P = P_0 + \rho gh$, опуская атмосферное давление P_0 , давление в точке A определяется весом жидкости над ней $P = \gamma h_A$, где удельный вес $\gamma = \rho g$, h_A – глубина погружения точки A . Из рис. 1.19 видно, что $z + h_A = h + z_1$, где z_1 – превышение самой низкой точки на дне реки над плоскостью сравнения $O-O$, поэтому уравнение средней удельной энергии (1.56) над новой плоскостью сравнения O_1-O_1 для рассматриваемого сечения можно записать так:

$$\mathfrak{E} = h + \frac{\alpha V^2}{2g}, \quad (1.57)$$

или с учетом соотношения $Q = V\omega$ и домножая числитель и знаменатель дроби на ω^2 :

$$\mathfrak{E} = h + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega^2}, \quad (1.58)$$

где $\mathfrak{E}$ – удельная энергия сечения, введена Бахметевым [Чертоусов, 1957].

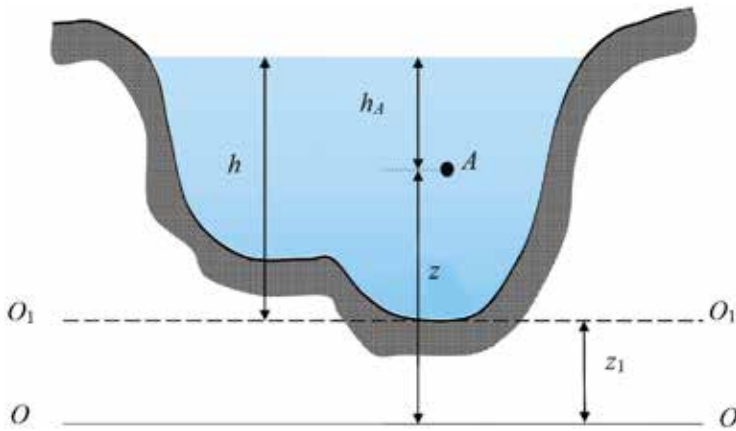


Рис. 1.19. Схема к выводу уравнения удельной энергии сечения. Обозначения в тексте

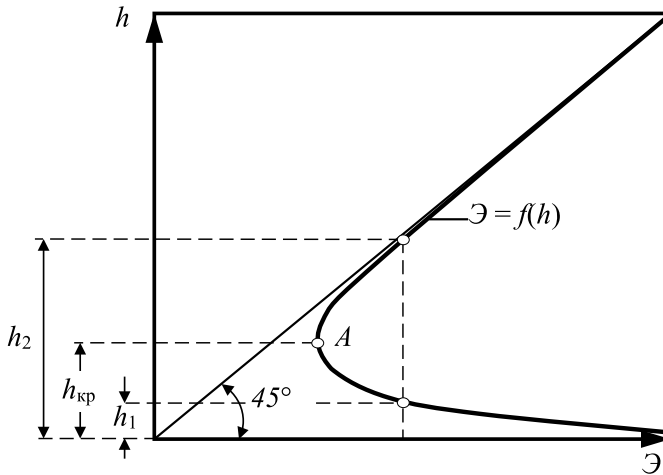


Рис. 1.21. Зависимость $\mathcal{E} = f(h)$ при постоянном поперечном сечении и одном значении расхода. Из: [Чертоусов, 1957]. Обозначения в тексте

поток, и если h меньше, чем $h_{кр}$, поток рассматривается как *бурный (послекритический)*. Теоретически критическая глубина является минимальной глубиной, которая может образоваться при перетекании потока через булыжник или дерево, или вершину водослива. Эту минимальную глубину следует измерять несколько выше по течению относительно края водослива из-за кривизны водной поверхности.

Скорость потока и глубина дополняют друг друга для данной удельной энергии и расхода. Рис. 1.22 иллюстрирует этот принцип для схемы «продольного разреза» участка реки. Выше большого камня в сечении 1 образуется точка разделения потока, возле которой несколько повышается уровень воды и образуется так называемая отбойная волна [Караушев, 1969]. Скорость растет там, где вода обтекает булыжник при соответствующем падении глубины (в соответствии с уравнением Бернулли). Скорость растет и в сечении 2, так как русло заполнено камнями, уменьшив площадь поперечного сечения, но не настолько значительно, по сравнению с сечением 1, поэтому глубина сокращается на небольшую величину. Сечения 3 и 4 расположены в области с быстрым изменением потока за счет работы камня как водослива, ниже которого образуется так называемый гидравлический прыжок – область сильной турбулентности с обратным вихревым течением, что сопровождается большим падением линии энергии (рис. 1.22).

Уравнения (1.56) и (1.57) основаны на предположении однородности потока. Они приблизительно правильны для постепенно меняющегося потока, показанного на рис. 1.22 в верхней части участка до сечения 3. Для быстро изменяющегося потока в сечениях 3 и 4 они не применимы. Должно быть также ясно, что в реке энергетическая линия будет определяться больше скоростью

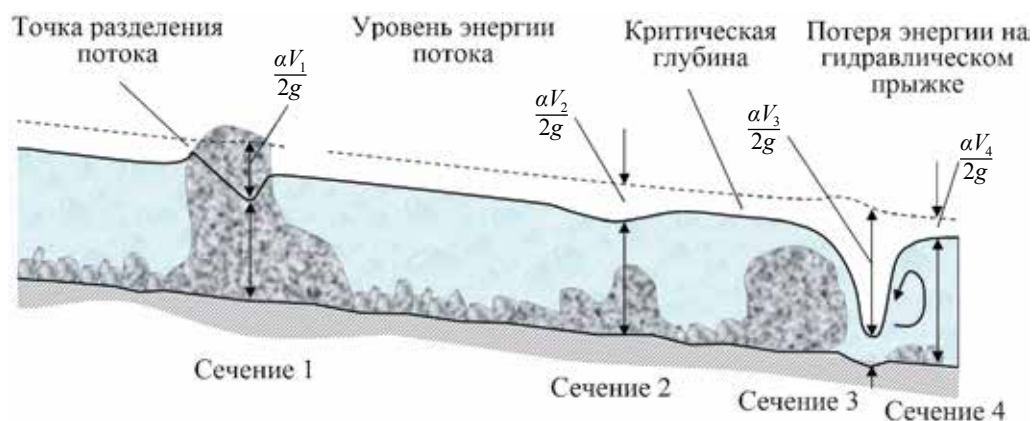


Рис. 1.22. Схематический разрез вдоль по течению реки. Пунктирной линией показано изменение удельной энергии. Сток равномерный в сечениях 1, 2 и 3 и бурный в сечении 4. Из: [Gordon et al., 2004]

и глубиной в целом по сечению, чем на отдельных вертикалях. Если перед препятствием в виде нагромождения камней, опоры моста или ствола дерева поток разделяется, уравнение может дать только приблизительное представление о скорости течения. Так как скорость в этой точке равна нулю, глубина потока равна удельной энергии $\mathcal{E}$. Глубина перед камнем $h_{тр}$ является, таким образом, примерно равной скоростному напору набегающего потока (рис. 1.22), т.е.

$$h_{тр} = \frac{\alpha V^2}{2g} \text{ или } V = \sqrt{2gh_{тр}}. \quad (1.59)$$

Уровень воды в точке разделения потока сильно колеблется, и для измерения глубины перед камнем следует руководствоваться визуальным осреднением по гидрометрической рейке либо использовать специальную рейку с успокоителем. При определении состояния потока используют различные количественные критерии, например число Фруда, определяемое по соотношению:

$$Fr = \frac{\alpha V^2}{2gh} \text{ или } Fr = \frac{V}{\sqrt{2gh}} \quad (1.60)$$

(форма, принятая в иностранной литературе),

где V – средняя скорость, м/с; g – ускорение силы тяжести; h – глубина, м. Число Фруда может быть рассчитано на любой вертикали, например, где вода течет над или между камнями; в таком случае должна быть использована местная глубина и скорость.

В отечественной литературе по гидравлике для тех же целей применяется так называемый параметр кинетичности Π_k :

$$P_k = \frac{\alpha Q^2 B}{2g\omega}. \quad (1.61).$$

При замене $\frac{Q}{\omega} = V$ и $\omega = B \times h$ уравнение параметра кинетичности преобразуется в число Фруда (1.60). Если $P_k(Fr) < 1$, поток принимает спокойное состояние, при $P_k(Fr) = 1$ – критическое, при $P_k(Fr) > 1$ – бурное. Следует отметить, что бурное и спокойное течение может наблюдаться как в ламинарном, так и в турбулентном потоке [Маккавеев, Чалов, 1986].

Обнаружить состояние потока можно визуально по характеру свободной водной поверхности и образованию волн. Направление распространения волн может быть использовано для локализации области спокойного и бурного потока в реках. Вокруг рейки или прута, опущенных под прямым углом в воду, будут образовываться V -образные волны, перемещающиеся вниз по течению. Если поток спокойный, волны распространяются на некоторое расстояние перед обтекаемым объектом (вверх по течению) и не появляются, когда поток бурный. При перемещении рейки по переходной зоне от спокойного потока к бурному может быть обнаружена критическая область, идентифицируемая как точка, в которой все волны перед объектом исчезают или угол между V -образными волнами составляет 45° [Gordon et al., 2004].

Число Фруда получает все большее признание как показатель условий мест обитания. При изучении распределения личинок ручейников, питающихся за счет фильтрации воды, Ветмор с соавторами [Wetmore et al., 1990] нашли, что число Фруда лучше характеризует среду обитания личинок, чем глубина или скорость, взятые индивидуально. Личинки предпочитают области, где линии тока сходятся над или около валунов и булыжников, с наибольшей концентрацией веществ для питания.

Важной задачей теоретических и практических исследований является разработка зависимости между скоростью и русловыми характеристиками. Если сток равномерный, то глубина и скорость неизменны вдоль русла. В этих условиях сила тяжести (как сила, вызывающая движение) и трение (как сила, препятствующая ему) находятся в равновесии. Сила трения, вызывающая сопротивление потоку вдоль границы русла, может быть пересчитана на единицу площади как напряжение трения. Для русел напряжение трения τ [Gordon et al., 2004] определяется как

$$\tau = \rho g R I, \quad (1.62)$$

где τ выражается в н/м^2 ; ρ – плотность жидкости; g – ускорение силы тяжести; R – гидравлический радиус, м; I – уклон водной поверхности, м/м, который в особенных условиях равномерного потока равен уклону русла.

Как неоднократно отмечалось, если русло широкое или прямоугольное, гидравлический радиус R может быть заменен средней глубиной. Напряжение

трения в целом уменьшается вниз по течению, так как уклон дна понижается и таким образом организмы в низовьях рек имеют лучшие условия для сопротивления сносу, чем в верховьях. Полагая силу тяжести в направлении потока, равную сопротивлению трения (предполагаемую приблизительно квадрату скорости), можно составить следующее уравнение:

$$V = \sqrt{\frac{\rho g}{\alpha} R \cdot I}, \quad (1.63)$$

где V – средняя скорость, м/с; α – коэффициент, который зависит преимущественно от шероховатости границ потока с руслом; остальные обозначения прежние.

Французский инженер Антонио Шези вывел это уравнение в 1768 г., когда проектировал канал в Париже [Henderson, 1966]. Член этого уравнения $\sqrt{\frac{\rho g}{\alpha}}$ обычно представляется в виде коэффициента Шези C , и уравнение тогда запишется в привычной для гидрологов форме:

$$V = C \sqrt{R \cdot I}. \quad (1.64)$$

Размерность коэффициента Шези C – м^{1/2}/с. Он изменяется, по данным Вайта [White, 1999], от 30 в небольших шероховатых каналах до 90 в больших и широких и считается функцией относительной шероховатости и числа Рейнольдса. Уравнение Шези широко используется в гидравлике и гидрологии [Чертоусов, 1957], при этом коэффициент Шези C определяется для значений R от 0,1 до 5,0 м по формуле Н.Н. Павловского:

$$C = \frac{1}{n} R^x, \quad (1.65)$$

где коэффициент шероховатости n оценивается по специальным таблицам [Караушев, 1955]. Значение показателя степени x вычисляется по эмпирической формуле:

$$x = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,10). \quad (1.66)$$

Для общих оценок x часто принимается равным 1/6 [Караушев, 1955]. Роберт Манинг, ирландский инженер, вывел альтернативное уравнение для равномерного потока в 1889 г.:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2}, \quad (1.67)$$

тогда

$$Q = \frac{\omega}{n} R^{2/3} I^{1/2}, \quad (1.68)$$

где n – коэффициент Манинга; остальные – обозначения прежние.

Уравнение Манинга было выведено из данных, собранных в искусственных и естественных руслах при различном изменении шероховатости. Показатель степени при R обычно варьирует от 0,6499 до 0,8395, и Манинг выбрал величину $2/3$ в качестве среднего приближения. Это уравнение для расчета характеристик равномерного стока в открытых руслах более распространено за рубежом. Таблица коэффициентов n приведена в ряде справочников и монографий [Чертоусов, 1957; Караушев, 1955; Chow, 1964].

Были предприняты попытки оценить зависимость коэффициента n от свойств донных отложений. Например, Штриклер в 1923 г. вывел следующее уравнение для гравелистого русла, когда d представляет собой средний диаметр отложений зерен (d_{50} , мм):

$$n = kd^{1/6}, \quad (1.69)$$

где n – коэффициент Манинга; k – коэффициент, величина которого равна, по Штриклеру, 0,015, по Чангу – 0,0166 [Маккавеев, Чалов, 1986], по Хендерсону [Henderson, 1966] – 0,013. Маккавеев и Чалов [1986] отмечают, что формула (1.69) дает заниженные результаты, так как шероховатость русла определяется не только крупностью наносов, но и формами донных гряд, поэтому следует различать «зернистую» и грядовую шероховатость. Обычно грядовая шероховатость больше зернистой, но на реках с валунно-галечными отложениями зернистая шероховатость преобладает, и формула здесь более применима. Было установлено, что коэффициент Манинга n также изменяется с глубиной. Уравнение (1.69) может быть применимо, когда элементы шероховатости небольшие в сравнении с глубиной, n преимущественно растет с увеличением относительной шероховатости. По Чоу [Chow, 1964], уравнение Манинга мало применимо при высоте шероховатости больше $1/3$ глубины. Относительная шероховатость включается в уравнение для оценки коэффициента Манинга n , выведенное Лимериносом [Gordon et al., 2004] по данным потоков с небольшим уклоном русла с отложениями от мелкого гравия до булыжников среднего размера:

$$n = \frac{0,1129R^{1/6}}{1,16 + 2 \log \frac{R}{d_{84}}}, \quad (1.70)$$

где R – гидравлический радиус, м; d_{84} – диаметр, м, для которого 84 % частиц донных отложений имеют меньший размер.

Для русел с большим уклоном (0,002–0,04) Джаррет [Gordon et al., 2004] в 1985 г. вывел уравнение:

$$n = 0,39I^{0,38}R^{-0,16}, \quad (1.71)$$

где составляющие аналогичны, приведенным в уравнении (1.68). Это уравнение применимо для стабильных русел с гидравлическим радиусом между 0,15 и 2,1 м.

Когда река выходит из берегов, скорости течения в основном русле обычно намного выше, чем на пойме. В таких условиях уравнение Шези или Манинга применяется для определения скоростей и расходов воды в отдельных секциях поперечного сечения. Эти расходы затем суммируются, чтобы получить общий расход реки. Средняя скорость для живого сечения, равная суммарному расходу, деленному на площадь поперечного сечения, слабо характеризует составное русло. Предполагается, что поверхность воды горизонтальна в пределах поперечного сечения и что уклон водной поверхности тот же самый во всех секциях. Следует также отметить, что смоченный периметр рассчитывается только там, где есть вода; это не включает области без воды между секциями (острова и другие русловые формы). Как полуэмпирические уравнения, уравнения Шези и Манинга можно использовать только в пределах диапазона, в котором они разработаны: трапецеидальные русла с равномерным потоком и чистой водой. Для практических целей сток через прямой участок с относительно постоянным поперечным сечением, средней скоростью и шероховатостью может рассматриваться в качестве приближения к равномерному потоку, и уравнения дадут хорошие результаты.

1.1.4. Речные потоки и русла

Речное русло находится под влиянием эндогенных и экзогенных сил. Эндогенные силы образуют деформации земной коры, которые могут действовать в одних случаях на протяжении миллионов лет, а в других (например, при землетрясениях) – в течение коротких временных интервалов. Геологический фундамент территории – это основа, на которой формируются реки. С экзогенными силами обычно связывают эрозию (разрушение) земной поверхности. Так называемый геологический фактор в гидрологии изучен слабо. Максимум, на что обращается внимание, – это карстовые явления и возможное несовпадение поверхностных водосборов с подземными [Воскресенский, 1962; Львович, 1963]. Вместе с тем формирование стока в горных и равнинных условиях идет по-разному [Бефани и др., 1967; Бефани, 1977; Виноградов, 1967; Денисов, 1965; Соседов, 1967, 1970, 1973; Федоровский, 1985, 1999]. Сложность оценки влияния геологических условий на реки имеет много причин. Во-первых, часто условия разного масштаба действуют одновременно и на одной и той же территории, во-вторых, недостаточно опубликованных и доступных для использования количественных данных о характеристиках подстилающих отложений, в-третьих, исторически сложилось так, что гидрологи в целом чаще занимаются процессами на поверхности водосборов, включая почвенный покров. То, что находится ниже почвенных горизонтов, изучается преимущественно гидрогеологами.

Речные долины. Эти природные образования занимают понижения в рельефе земной поверхности, по большей части унаследовавшие геологические

структуры разного масштаба. Однако их роль по-разному проявляется в современных горных и равнинных районах [Бредшоу, 1977]. Наиболее отчетливо геологическая структура видна в горно-складчатых областях [Граменицкая, 1965; Борсук, 1973; Худяков, 1977]. В зонах локальных нарушений ослабленные трещинами горные породы более подвержены выветриванию и эрозии, здесь сформировались эрозионные борозды и долины самых малых рек (рис. 1.23). Региональные разломы и прогибы земной коры шириной десятки и длиной сотни километров стали долинами средних и больших горных рек.

Динамика речных потоков и русловые процессы в горных районах контролируются тектоническими процессами и литологическими особенностями подстилающих горных пород. Вдвигание горных массивов способствует врезу речных долин в подстилающие отложения, развитию склоновой и русловой эрозии, интенсивному выносу рыхлого материала в межгорные котловины, предгорья и на равнины. Здесь формируются глубоко врезуемые речные долины (рис. 1.24). Переход фундамента в относительно стабильное состояние, обусловленное ослаблением вертикальных движений, ведет к снижению водоразделов и формированию менее глубоких речных долин с неширокими поймами (рис. 1.25).

Графики изменения глубин врезов речных долин от верховьев к устью (на примере некоторых горных рек юга Дальнего Востока) показывают, что наибольшие их величины наблюдаются на первых километрах от истока, достигая 400–500 м, затем глубины врезов постепенно уменьшаются, и при выходе рек в предгорья глубины врезы долин не превышают 50–100 м [Федоровский, 1985, 1999].



Рис. 1.23. Начало образования эрозионной борозды на горном склоне (1). Со временем эрозионные борозды углубляются, формируя истоки малых горных рек (2). Фото с сайтов <http://img-fotki.yandex.ru> и <http://www.m-iron.ru>



Рис. 1.24. Глубоко врезающиеся речные долины в области интенсивного поднятия: 1 – участок слабо разработанной речной долины в виде ущелья; 2 – более разработанная долина с элементами поймы (Горный Алтай). Фото с сайтов <https://photographers.ua/photo/sred-uscheliy-gornyh-rek-846312/> и <http://www.zapoved.net>



Рис. 1.25. Участок реки в области незначительных вертикальных движений (Горный Алтай). Фото с сайта <http://h8.img.mediacache.rugion.ru>

Литологический фактор в формировании речных долин в горных районах проявляется в том, что процессы эрозии в любом случае идут быстрее на склонах, сложенных менее крепкими горными породами [Карасев, Худяков, 1984].

Остатки древних геологических структур, обрамляющих платформенные области, характеризуются низкогорными массивами, возвышенностями, холмами и сопками (рис. 1.26) и служатместилищем бесчисленного количества долин полугорных рек.

Огромное число рек протекает по устойчивым в тектоническом отношении платформенным структурам, на которых расположены равнины, например Среднеевропейская, Восточно-Европейская (Русская), Западно-Сибирская, Амурско-Зейская, Приханкайская, Северо-Сахалинская и другие, покрытые километровыми толщами рыхлых отложений.

Равнинные реки (рис. 1.27) имеют незначительные эрозионные врезы своих долин (50–100 м) и самостоятельно формируют русло и пойму [Маккавеев, Чалов, 1986]. В этих условиях влияние геологических особенностей терри-



Рис. 1.26. Сопки на берегу Амура (1). Сопки с эрозионными бороздами, заполненными снегом (2), Магаданская область. Фото с сайтов <http://www.dergachev.ru> и <http://www.fotosoyuz.ru>



Рис. 1.27. Долина типично равнинной р. Ока с точечным побочным на внутреннем берегу меандра, симметричным ему плесом и размывом на противоположенном берегу. Фото с сайта <http://s.pikabu.ru/images>

тории проявляется слабее. Вместе с тем влияние тектонических движений на формирование русел рек в равнинных условиях, на наш взгляд, изучено пока недостаточно.

Значительная часть междуречий равнинных территорий покрыта овражно-балочной сетью. Местами это лишь эрозионные борозды и неглубокие овраги (рис. 1.28), которые при благоприятных условиях могут расширяться и углубляться, достигая внушительных размеров.

Верхние звенья речной сети равнин часто представлены затухающей формой эрозионных процессов – широкими балками (рис. 1.29).

Расчлененность рельефа, трещиноватость пород горных склонов, обуславливающая водоудерживающие свойства отложений, как проявления геологических факторов, при прочих равных условиях (атмосферные осадки, другие характеристики климата, почвенно-растительные условия) во многом определяют речной сток.

В равнинных условиях расчлененность рельефа диктуется климатическими факторами и водно-физическими свойствами почвы, из-за чего ее влияние на речной сток существенно сглаживается. В любом случае речная сеть – это своеобразная система каналов: чем их больше на единицу площади, тем выше сток с дренируемой ими территории.



Рис. 1.28. Овражно-балочная сеть: слабо расчлененное Волго-Донское междуречье. Фото с сайта <http://stepnoy-sledopyt.narod.ru>

Речное русло. Самая низкая часть речной долины – это речное русло, в котором располагается поток в среднюю и низкую водность. По мере продвижения вниз по течению русло изменяет свою форму, наращивает ширину, глубину и объем переносимых рыхлых материалов – *наносов*, что сопровождается изменениями в распределении речной биоты. Во время половодий и паводков речное русло не в состоянии вместить водный поток и он заливает прилегающую к руслу часть речной долины – *пойму*, на которой могут формироваться дополнительные русла (так называемые рукава), старицы и озера, служащие



Рис. 1.29. Глубоко расчлененные балочные долины – типичный рельеф юга Саратовского Поволжья. Фото с сайта <http://www.zapoved.net>



Рис. 1.30. Речное русло равнинного участка р. Дунай с обширной поймой, протоками, старицами и небольшими пойменными озерами. Фото с сайта <http://www.indeltadunarii.ro>

местами обитания водных организмов и растительности. Здесь излюбленное место нереста многочисленных пород рыб (рис. 1.30).

В сравнении со статикой и динамикой жидкости, где теоретический уровень обобщения достаточно высок, теория наук «Динамика речных потоков» и «Русловые процессы», изучающих более сложные явления, еще далека от совершенства, в ней пока преобладают полуэмпирические подходы [Гришанин, 1979]. Вместе с тем большинство необходимых для практики задач решено и доведено до уровня инженерных расчетов [Чертоусов, 1957; Гончаров, 1962; Караушев, 1969; Маккавеев, Чалов, 1986]. Сложнее обстоит дело со взаимодействием речных потоков с водными организмами. Несмотря на значительные успехи гидробиологии и экологии в этой области [Богатов, 1994; Gordon et al., 2004; Allan, Castillo, 2007] и др., переход от точечных экспериментальных исследований к теоретическим пространственным обобщениям еще предстоит сделать.

Типы рек и формирование их русел

Реки, протекающие в различных ландшафтных и климатических условиях, существенно различаются как по водному режиму и формированию водного баланса и стока, так и по русловым формам и механизмам их образования

[Маккавеев, Чалов, 1986]. В последнем случае важнейшим признаком служит уровень кинетической энергии потока, характеризующийся рядом показателей, например числом Фруда [см. уравнение (1.60)]:

$$Fr = \frac{\alpha V^2}{2gh},$$

где α – поправка к скорости; V – средняя скорость, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; h – глубина, м.

Как отмечалось выше, значения числа Фруда $Fr < 1$ соответствуют спокойному потоку, при $Fr = 1$ поток находится в критическом состоянии, при $Fr > 1$ становится бурным (или сверхкритическим).

Маккавеев и Чалов [1986] разделили все реки по типам русел (табл. 1.8). Каждый тип русла наблюдается в пределах определенного диапазона уклонов в зависимости от водности реки, которая характеризуется здесь площадью водосбора (км²). Действительно, небольшие реки площадью < 10 км², например реки бассейна р. Комаровка в предгорьях хребта Сихотэ-Алинь, имеют средне-многолетний расход за наиболее высоководный летнее-осенний период не более 0,06–0,07 м³/с [Богатов и др., 2013]. Энергетический потенциал их мал. Большие реки, собирая сток огромного количества мелких рек, гораздо полноводнее, и запас кинетической энергии их выше. Однако если рассматривать удельную водоносность (объем стока с единицы площади водосбора), то небольшие реки оказываются существенно более водоносными [Федоровский, 1985].

Равнинные реки. Реки этого типа (рис. 1.27 и 1.30) отличаются незначительными продольными уклонами и спокойным режимом водного потока (число Фруда $Fr < 0,1$), за исключением участков порогов и искусственных сооружений (плотин, шлюзов и т.п.), на которых равнинные реки приобретают бурный

Таблица 1.8. Типы русел рек и соответствующие им значения уклонов и числа Фруда по: [Маккавеев, Чалов, 1986]

Тип русла	Интервалы уклонов (‰) у рек с площадью бассейна			Число Фруда
	> 100 км ²	10–100 км ²	< 10 км ²	
Равнинное	< 0,5	< 6–7	< 14–15	< 0,1
Полугорное	0,5÷5–6	6–7÷25–26	14–15÷40–50	0,1–0,3
Горное:				
а) с развитыми аллювиальными формами (грядовые)	5–6÷15–16	25–26÷55–60	40–50÷70–80	0,3–0,8
б) с неразвитыми аллювиальными формами (безгрядовые)	15–16÷23–27	55–60÷100–105	70–80÷120–125	0,8–1,2
в) порожисто-водопадное	> 23–27	> 100–105	> 120–125	> 1–2

Примечание. Уклоны даны в промилле: 1,0 ‰ означает снижение отметок вдоль русла на 1 м на расстоянии 1 км.

характер ($Fr > 1$). При этом реки с площадью водосбора $< 10 \text{ км}^2$ и соответственно небольшой водностью остаются спокойными при уклонах до 14–15 ‰. Реки большего размера и водности имеют спокойное течение при более низких значениях уклона долины (табл. 1.8).

Протекая по стабильным платформенным образованиям в течение длительного периода, равнинные реки образовали выработанный продольный профиль, что определяет руслоформирующую деятельность главным образом водностью потока и прочностью слагающих русло и пойму рыхлых отложений. Во время подъема волн весеннего половодья и дождевых паводков нарастает приток рыхлого материала с поймы и из-за размыва берегов, когда он превышает способность потока переносить наносы, часть их аккумулируется, что ведет к формированию донно-грядовых и других русловых форм. На спаде волн аккумулированные отложения частично размываются и переоткладываются; на значительном протяжении рек происходит смещение донно-грядовых русловых форм вниз по течению [Гришанин, 1979].

Типичной формой движения донных отложений равнинных рек являются гряды с пологим верхом и крутым низовым откосом, которые смещаются под действием потока вниз по течению. Увеличивая сопротивление потоку, гряды снижают средние скорости течения, что способствует осаждению наносов. В межень, особенно в низководные годы, на грядах прибрежных и других участков (побочни, косы, осередки и т.п.) закрепляется растительность, соответственно растет шероховатость и сопротивление потоку, а следовательно, и накопление наносов при последующих повышении уровней воды. Со временем эти участки превращаются в продолжение поймы или формируют речные острова.

Выделяются две разновидности речных русел равнинных рек: врезанные и широкопойменные [Маккавеев, Чалов, 1986]. Первые формируются на пересечении массивов, сложенных относительно устойчивыми к эрозии отложениями и горными породами (плотные глины, выходы скальных пород и т.п.). Плановые очертания русел в скальных породах могут быть прямолинейными или меандрирующими (врезанные меандры). Пересечение равнинными реками горных массивов образуют теснины с высокими скоростями течения. Пойма на участках врезанных русел часто не выражена отчетливо или отсутствует, русла устойчивы, плесы отличаются большими глубинами. Широкопойменные русла имеют ряд разновидностей. Это реки с неразветвленным, прямолинейным руслом, разветвленные на рукава и с извилистым меандрирующим руслом, иногда имеющим пойменную многорукавность.

Полугорные реки. Этот тип рек занимает промежуточное положение между равнинными и горными реками, поэтому характеризуется русловыми процессами и формами и тех, и других. Реки приобретают бурный характер во время половодий и паводков, в межень они поддерживают бурный режим потока

(число Фруда $Fr > 1$) только на перекатах, на остальных участках течение, как правило, спокойное ($Fr = 0,1-0,3$), нарушаемое отдельными валунами, скоплениями древесного мусора. Располагаются такие реки в пределах невысоких горных хребтов и межгорных котловин или в предгорьях крупных горных систем.

С увеличением уклона характер полугорных рек все более приближается к горным рекам, по мере снижения уклонов и расширения долин реки по морфологическому облику близки к равнинным рекам. Небольшие реки ($< 10 \text{ км}^2$) обладают спокойным режимом при значительных уклонах (от 14 до 50 ‰), реки большего размера могут принимать спокойный режим при меньших уклонах (табл. 1.8). Русловые процессы полугорных рек различны для сужений и расширений долин. В первом случае имеет место слабоизвилистое русло с неширокой, часто односторонней поймой и галечно-валунными перекатами. Во втором случае нередко многорукавность и относительно широкая пойма. Транспорт наносов в обоих случаях преимущественно грядовый.

Горные реки. Этот тип рек весьма разнообразен по строению долин и русел и определяется главным образом структурой и морфологией горных образований, в пределах которых они заложены. Общим признаком горных рек служат высокие запасы потенциальной и кинетической энергии и как следствие бурный характер течения ($Fr > 1$). Продольный профиль рек преимущественно ступенчатый: короткие участки с быстринами чередуются с порогами и водопадами. Различия в крутизне продольного профиля обуславливают различия в русловых отложениях и режиме русловых деформаций. Часто наблюдается соизмеримость глубин рек с размером галечно-валунных и валунно-глыбовых русловых отложений (рис. 1.31). На участках рек с небольшими уклонами



Рис. 1.31. Участок горной реки с пенящимся потоком между валунами. Фото с сайта <http://club.vengrov.ru>

могут возникать грядовые формы донных отложений, однако на большинстве крутых участков преобладает безгрядовая форма движения наносов [Маккавеев, Чалов, 1986]. В руслах распространены галечные, галечно-валунные отложения, отдельные крупные обломки горных пород или их нагромождения. Струи воды в межень текут между камнями, переливаются в местах каменных запруд небольшими водопадами, ниже которых часто образуются глубокие ямы. Это весьма комфортные условия обитания для распространенных здесь рыб.

На относительно пологих участках рек развиваются крупные грядовые аллювиальные формы, так называемые антидюны. Здесь также имеется существенное различие в уровне кинетической энергии для рек (табл. 1.8). На изгибах рек образуются отложения, представленные сортированным галечным материалом, вдоль которых располагается плес с относительно большими глубинами (рис. 1.32). Нередки здесь перекаты, которые практически никогда не меняют своего положения. Транспорт наносов на горных реках осуществляется во время крупных половодий и паводков. Высокая кинетическая энергия потока ($Fr \gg 1$) при скоростях течения 2–3 м/с ведет к взвешиванию в потоке не только гальки и гравия, но и достаточно крупных обломков горных пород. На спаде паводка и в межень транспорт взвешенных и влекомых наносов сокращается, и вода осветляется.



Рис. 1.32. Относительно пологий участок горной реки с чередованием на изгибах галечных отложений, вдоль которых располагаются плесы. Фото с сайта <http://int.rgo.ru>

Русла горных рек обычно беспойменные, однако в местах расширения долин пойма может сформироваться, и русло в таких местах может делиться на рукава, между которыми располагаются закрепленные редкой растительностью галечно-валунные поля. В районах с селевой активностью нередко образование нагромождений глыб и валунов, через которые прорывается бурный поток [Маккавеев, Чалов, 1986]. Ваннот с соавторами [Vannote et al., 1980] считают, что структура и функционирование речного сообщества приспосабливаются к изменениям физических условий обитания. Поэтому важно учитывать тип и направление изменения русловых процессов. Бови [Bovee, 1982] отметил, что предположение о неизменности состояния реки и условий обитания в современной форме неправильно, если река не находится в состоянии равновесия.

Русловые формы. По форме русел реки могут быть прямыми, меандрирующими, многорукавными (а также разветвленными) из-за различий в подстилающих отложениях, уклоне местности, особенностях динамики стока воды и наносов [Маккавеев, Чалов, 1986]. Русловые формы могут также со временем меняться, например, реки, которые имеют многорукавность при одном уровне воды, могут начать меандрировать при более высоких или низких его значениях (рис. 1.33).

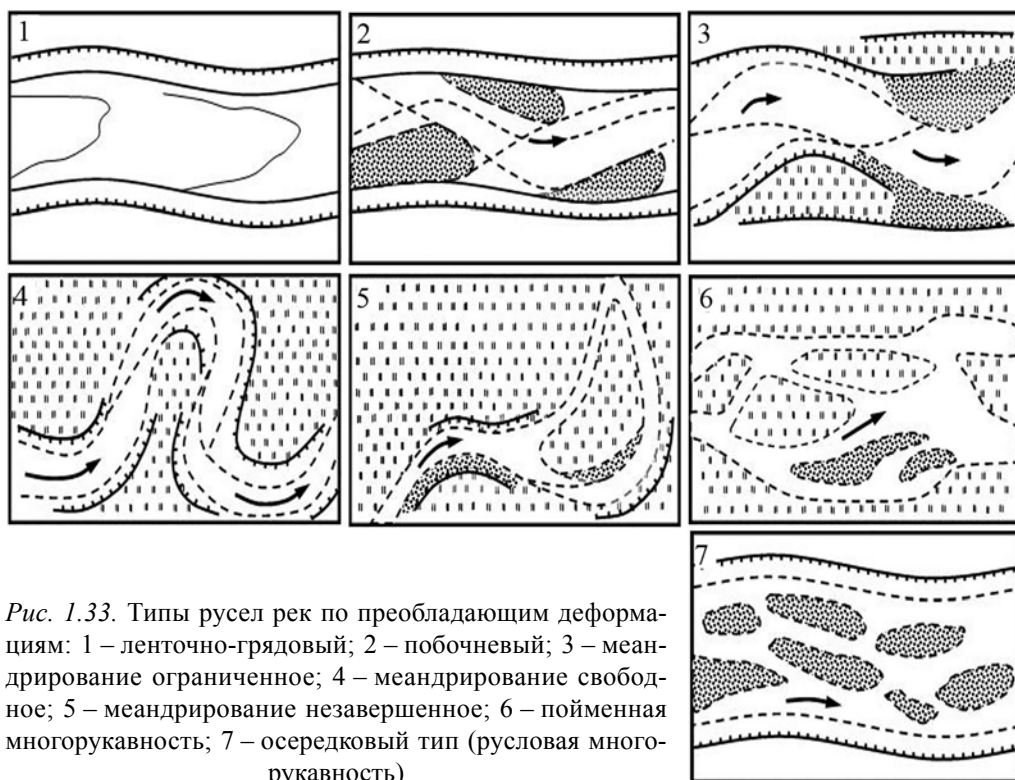


Рис. 1.33. Типы русел рек по преобладающим деформациям: 1 – ленточно-грядовый; 2 – побочный; 3 – меандрирование ограниченное; 4 – меандрирование свободное; 5 – меандрирование незавершенное; 6 – пойменная многорукавность; 7 – осередковый тип (русловая многорукавность)

В горной местности русла наследуют формы врезуемых долин, заложенных в местах геологических структур (разломов, надвигов, сбросов и т.п.). В своих низовьях горные реки часто переходят в полугорные или в равнинные, в широких долинах которых накапливаются аллювиальные отложения, и их уклон уже не так значительно зависит от окружающего рельефа. В целом, многорукавные русла характеризуются большими уклонами и значительной энергией потоков, а меандрирующие – более низкими уклонами и меньшей энергией. Многорукавные реки также ассоциируются с грубозернистыми отложениями на дне и берегах и движением твердого стока преимущественно в виде влекомых наносов. Для сравнения, русла меандрирующих рек имеют более мелкозернистый материал на дне и берегах, и твердый сток переносится преимущественно в виде взвешенных наносов.

Извилистость русел в плане имеет ряд показателей. Так, в отечественных гидрологических расчетах рассматривается коэффициент извилистости как отношение фактической длины реки, определенный по карте, к длине прямой, соединяющей сток и устье [Клибашев, Горошков, 1970]. В отечественной и зарубежной геоморфологии широко используется мера, называемая показателем извилистости (SI) [Gordon et al., 2004]:

$$SI = \frac{\text{длина русла по тальвегу}}{\text{длина долины}}. \quad (1.72)$$

Показатель SI обычно рассчитывается по измерениям длин рек и долин по картам и аэрофотоснимкам. Длина участка реки должна быть, по крайней мере, раз в 20 больше средней ширины русла. На прямых реках показатель SI равен 1, достигает величины 4,0 при сильном меандрировании. Термин *извилистый* иногда присваивается рекам, рисунок которых находится между прямыми и меандрирующими. Классификация форм русловый сети, основанная на их извилистости, характеристике берегов, стока наносов, отношении ширины к средней глубине реки (B/H) и скорости течения при заполненном русле (BF – скорость), приведена в табл. 1.9.

Рисунок русла служит одной из переменных, которая может быть модифицирована рекой, чтобы улучшить эффективность, с которой она транспортирует воду и наносы. Изменения в уклоне, типе и количестве наносов нередко приводят к изменениям рисунка русел и, таким образом, к условиям обитания речных сообществ. Существуют пороговые состояния, означающие, что на одном участке реки большое изменение уклона и/или расхода наносов мало влияет на форму русла, а на другом – небольшое изменение в уклоне или стоке наносов может иметь «поражающие последствия». Русла меняют форму из однорукавных к многорукавным часто в связи с сокращением прибрежной растительности [Leopold et al., 1964].

Взаимодействие между потоком и руслом подчиняется известным физическим законам, что приводит к образованию ограниченного набора

Таблица 1.9. Классификация речных форм по: [Gordon et al., 2004]

Тип русел	Описание	В/Н	SI	V_{BF}^{-} , м/с
Прямые	Одно русло с меандрирующим тальвегом. Хорошо выраженные берега, часто содержащие скальные породы. Русло обычно устойчивое с небольшими расширениями. Твердый сток представлен взвешенными и влекомыми наносами; их сток мал по сравнению с транспортирующей способностью реки. Поперечное сечение часто имеет в центре выраженный «горб». Встречается на коротких участках (также на канализованных реках).	<40	1,0–1,5	>3
Меандрирующие	Одно петляющее русло обычно с хорошо выраженными берегами. Смещения русла происходят из-за эрозионного подрезания берегов на внешней петле, что выражается в разрастании вширь и смещении меандров вниз по долине. Плесы имеют высокие скорости течения. Могут встречаться «прорывы» через основание петли меандра, оставляющие «старичные озера» серповидной формы (рукава), которые поддерживают экологически отличные от речной формы биоты. Песчаные и гравелистые побочни формируются на внутренней стороне петель. Твердый сток представлен преимущественно взвешенными наносами, приблизительно равный транспортирующей способности реки. Длина волн меандров составляет от 10 до 14 ширин русла.	<40	1,5–4,0	1–3
Многорукавные	Много русел с побочнями, косами и островами, часто с плохо выраженными берегами из несвязанного рыхлого материала. Русловая и береговая эрозия носит отчетливо случайный характер. Сток концентрируется по боковым каналам, увеличивая скорость и транспортную способность. Встречается на ледниковых реках, аллювиальных равнинах и дельтах.	>40	1,0–2,0	Меняется
Переплетающиеся	Много русел с устойчивыми островами, покрытыми растительностью, в сравнении с многорукавными реками, где русла постоянно сдвигаются. Берега устойчивые, твердый сток представлен преимущественно взвешенными наносами.	<10	Меняется	Меняется

повторяющихся русловых форм. Формы рельефа дна имеют исключительно важное значение для водных организмов [Allan, Castillo, 2007]. Кондратьев [1959] предложил различать три основных вида русловых форм в порядке убывания их продольных размеров: макроформы – морфологические пары плес–перекат, пойменные извилины и разветвления; мезоформы – побочни, осередки, аккумулятивные острова и микроформы – рифели, гряды и антидюны. Как отмечает Сидорчук, «хорошо развитый комплекс руслового рельефа обычно состоит из следующих структурных ячеек (по увеличению размеров): 1) рябь; 2) рифели; 3) дюны; 4) заструги; 5) шалыги; 6) песчаные волны; 7) побочни (осередки, ленточные гряды); 8) излучины, разветвления, прямолинейные участки; 9) серии излучин, макроизлучины; 10) параллельно-рукавные, пойменные и дельтовые разветвления» [1991, с. 22].

Плес – это наиболее глубокая область русла со спокойным течением и тонкими русловыми отложениями, перекат – мелководная область с грубыми донными отложениями и повышенными скоростями течения, иногда с бурным режимом потока. На перекатах профиль поперечного сечения часто прямоугольный, тогда как на плесах имеет более асимметричное строение. Плесы и перекаты всегда следуют в связке [Гришанин, 1979]. Их периодичность может быть важна для распределения питательных веществ водных организмов [Goldman, Horne, 1983]. Типичный перекат на равнинной реке представляет собой гряду, пересекающую русло под углом 20–30° (рис. 1.34).

Самая глубокая часть переката называется корытом, прибрежные отдели – побочнями. Сверху и снизу по течению к перекату примыкают глубокие части русла, называемые плесовыми ложбинами, или плесами. На перекате,

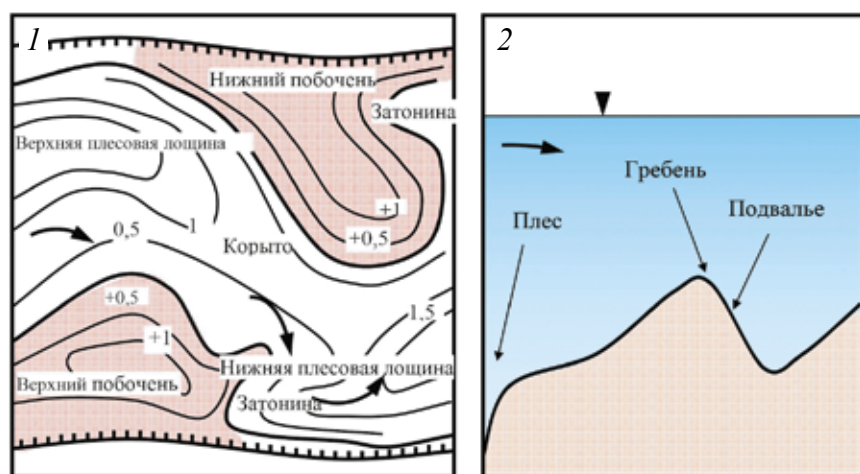


Рис. 1.34. Основные элементы рельефа переката в плане (1), в продольном разрезе (2).
Из: [Маккавеев, Чалов, 1986]

изображенном на рис. 1.35, в межень поток переходит от левого берега к правому. На нижнем плесе динамическая ось потока прижимается к берегу, что ведет к его размыву.

Судовой ход с наибольшими глубинами переходит как на вышеприведенной схеме от левого берега, где мель побочня ограничена белым бакеном, к правому. Вдали веден правый побочень, ограниченный красным бакеном (рис. 1.35).

Перекаты стремятся «поддержать» высокие плотности бентосных беспозвоночных и, таким образом, являются важным поставщиком пищи для рыб. Из-за конкуренции и хищничества, так же как и размерных ограничений, мальки и молодая рыба стремятся обитать на плесах; глубокие плесы с нависающими берегами и растительностью любит и большая рыба.

В течение маловодий плесы могут стать изолированными «карманами» воды, которая позволяет выжить водным организмам. Бови [Bovee, 1982] предлагает использовать обитателей плесов в качестве индикаторов при определении требований к низкому стоку на реках. В отношении физических условий обитания структура плес–перекат дает большое разнообразие русловым формам, субстрату и местным скоростям течения. Реки с большой продуктивностью содержат комбинации плесов разного размера [Hamilton, Bergersen, 1984]. Бруссок с соавторами [Brussock et al., 1985] считает, что причина повышения биотического разнообразия в середине рек кроется, в частности, в преобладании здесь плесо-перекатной морфологии.



Рис. 1.35. Перекат на равнинной р. Дон. Фото с сайта <http://photo.qip.ru>

Плесы и перекаты на равнинной реке сложно определить при наполнении русла по бровку (по англоязычной терминологии BF – bankfull). На рис. 1.36 плес и перекат проявляются незначительной рябью водной поверхности в области повышенных скоростей течения. Легче они определяются на глаз при низком стоке. Однако где начинается один и заканчивается другой, могут показать только промерные работы. Чередующиеся плесы и перекаты являются наиболее общим явлением на реках со смешанными русловыми отложениями, изменяющимися от щебня и гальки до крупных камней. Это может быть выражено как на полугорных реках с высокой изменчивостью стока (см. рис. 1.32), так и на равнинных (рис. 1.37).

Последовательности плес–перекат часто встречаются на меандрирующих реках с плесами, расположенными на петле меандра, и перекатами у пересечения с другой петлей (рис. 1.38). Как следовало бы ожидать из средней длины меандров (табл. 1.8), глубокие и мелкие места следуют на более или менее регулярном расстоянии, составляющем от 5 до 7 ширин русла [Leopold et al., 1964]. «Шум» в ритмической структуре может быть из-за местных ограничений, таких как выступы скал или корней деревьев, или увеличенного запаса крупнозернистых отложений.

Эти полурегулярные структуры встречаются и на прямолинейных руслах, и на каменистых реках, и на пересыхающих временных реках в засушливых районах. На крутых крупнокаменистых горных реках последовательность плес–перекат заменяется последовательностью плесов (ям) и порогов (ступеней), где вода прыгает через отложения из камней и ныряет через небольшие водопады в размытые плесы (ямы) (рис. 1.39).



Рис. 1.36. Перекат на типично равнинной р. Ока при наполненном русле

«Органические» пороги могут быть созданы большими упавшими деревьями или запрудами из обломков и мусора. Эти запруды из обломков также имеют тенденцию к регулярному распространению [Morisava, 1985]. Для постоянной флоры и фауны важно, чтобы плесы и перекаты оставались примерно на тех же местах, они менее чувствительны к постоянному перемещению более мелких донных гряд.

Побочни, осередки, косы. Эти русловые формы представляют собой довольно большие образования, созданные отложением наносов. В то время как затопленные песчаные косы могут создавать определенные трудности судоходству (см. рис. 1.35), открытые косы могут укрепиться растительностью и стать островным убежищем для водоплавающей дичи). Подобно структурам типа плес–перекат, косы формируются при высоких расходах воды и затем остаются на месте, определяя положение меженного русла. Они разнообразны по форме, размеру частиц и составу отложений.

Точечные побочни формируются преимущественно на внутреннем берегу меандров и часто создают песчаные пляжи с небольшим уклоном к воде (см. рис. 1.27). Чередующиеся побочни имеют место на реках с относительно прямолинейным руслом то на одном, то на другом берегу с меандрирующим тальвегом между ними. Побочни в месте слияния рек образуются там, где притоки впадают в основное русло. Поперечные гряды (косы) пересекают реку под некоторым углом. На реках с песчаными грунтами они имеют выровненную поверхность и покрыты малыми русловыми формами типа донных рифелей. Русловые образования в середине русла называются осередками и характеризуют многорукавные участки рек. Они расположены вдоль потока, разделяют его на рукава и имеют тенденцию прирастать нижним по течению концом. Осередки сложены, как правило, грубообломочным материалом на верхних и мелкозернистым на нижних своих концах (рис. 1.40).



Рис. 1.37. Чередование плесов и перекатов на равнинной р. Пемигевасс близ Полимута.

Фото с сайта <http://www.nhdfi.org>



Рис. 1.38. В низкую воду плесы–перекаты и отложения хорошо видны на меандрирующей р. Мечкереве в верховьях р. Анадырь. Фото с сайта <http://www.anadyr.org>

Дюны, рифели и плоские песчаные днища. Реки с песчаными грунтами представляют благоприятный ландшафт для бентосных беспозвоночных, водной растительности, ищущих точку опоры. Из-за малых размеров и более однородного состава зерен песчаные русла рек мобильны и легко преобразуются в донные формы под влиянием течения воды. И наоборот, донные



Рис. 1.39. На горных речках пороги образуются из завалов камней, за которыми располагаются глубокие места (ямы). Фото с сайта <http://img-2003-08.photosight.ru>



Рис. 1.40. Осередок в среднем течении р. Сазитна (Аляска, США). Фото В. Богатова

формы в качестве отклика создают сопротивление, влияя на местные скорости течения, касательные напряжения и транспорт наносов. Местные размывы и отложения в пределах ложбин и поперечных гребней вызывают что-то вроде самосохранения форм донных отложений.

Из исследований на лотках и в естественных руслах найдена довольно предсказуемая последовательность форм донных отложений при увеличении энергии речного потока. При режиме низкого стока транспорт наносов относительно мал и сопротивление потоку высоко из-за значительного разделения областей за вершинами дюн и рифелей. При режиме высокого стока сопротивление падает и транспорт наносов увеличивается. Развитие форм донных отложений обычно образуют устойчивые последовательности. Плоское песчаное дно – редкое явление вне лабораторных условий. Для лотков и теоретических построений оно служит в качестве начальной точки. При увеличении скорости течения воды зерна песка начинают движение вначале поодиночке, а затем группами. Так как зерна двигаются вместе над речным дном, то и аккумулируются они также кластерами. Часто кластеры частиц ориентируются серией регулярных волн в продольном направлении по стоку, образуя так называемые рифели [Гришанин, 1979; Сидорчук, 1991].

Рифели представляют собой небольшие песчаные волны (гофры) на речном дне с относительно острыми вершинами (рис. 1.41). Они формируются в гидравлически гладких (однородных) условиях. Больше мелких наносов – более хорошо выполнены рифели. Расстояние между рифелями относительно равномерное. Длина волны рифелей зависит от размера частиц и не зависит от глубины потока. Обычно она изменяется от 15 до 45 см. Если поток движется по гидравлически шероховатой поверхности, т.е. с крупнозернистыми донными отложениями, начинают формироваться дюны, а не рифели. Дюны имеют закругленные вершины и крупнее рифелей. Их размеры связаны с глубиной потока и лишь немного зависят от размера частиц [Гришанин, 1979]. Дюны увеличиваются до точки, где их рост невозможен из-за высоких скоростей и интенсивного переноса на вершине.

И рифели, и дюны перемещаются вниз по течению, так как зерна песка поднимаются по их более слабо наклоненной верхней стороне и падают вниз на нижней. Песок, отложенный на верхней стороне, плотно слеживается, в то время как отложения на нижней его стороне находятся в неустойчивом состоянии. При увеличении энергии потока и приближении числа Фруда (Fr) к 1 рифели и дюны начинают размываться. Из крупных частиц наносов при достаточно высоких скоростях течения и при числе Фруда около 0,84 на дне



Рис. 1.41. Мелкие формы рельефа дна: 1 – рифели на р. Хантер (Австралия), течение справа налево; 2 – дюны синусообразной формы на р. Корнваллис близ Вулфвилла (Канада).

Фото с сайта <http://upload.wikimedia.org>

образуется волнистая поверхность. Волны на водной поверхности сопровождают образование округлых волн на дне, называемых антидюнами. Они очень неустойчивы и постоянно переформируются, последовательно смещаясь вверх по течению, так как песок размывается с нижней стороны дюны и откладывается на верхней по течению стороне. Длина антидюн изменяется от 0,2 до 6 м [Маккавеев, Чалов, 1986] и составляет примерно двойную глубину потока. Они наблюдаются в естественных реках с отложениями мелкого песка и крупного гравия. На этом этапе образования донных форм скорости потока и транспорт наносов относительно высоки.

1.1.5. Речные наносы

Реки переносят с потоком воды частицы неорганического и органического происхождения, в том числе растворенные в воде вещества, поступающие в реки вследствие выветривания и разрушения горных пород, размыва грунтов, почвенного покрова, и огромное количество органических, минеральных продуктов жизнедеятельности растительного и животного мира. В гидрологии принято называть перемещаемые водой минеральные частицы наносами [Караушев, 1969]. Растворенные в воде вещества относят к так называемому химическому стоку, или стоку растворенных веществ. Органические вещества, находящиеся в растворенном и коллоидном состоянии, относят к органическому стоку, или стоку органических веществ [Алекин, 1970]. В прикладных гидробиологических исследованиях также принято выделять в отдельную категорию переносимые реками крупные органические остатки, например плавающие обломки древесины, листья и т.п. [Gordon et al., 2004].

Твердый материал поступает в реки с окружающей территории в результате эрозии склонов, размыва надпойменных террас, пойменных участков речных долин, берегов и дна русел рек. Эта категория может быть подразделена по составу, плотности, скорости транспорта, распределения в потоке или химическому и минералогическому составу. Наносы, как твердый минеральный материал, отделяются от частиц органического вещества в процессе лабораторного анализа. Для характеристики состава речных наносов и отложений используются данные о геометрических размерах и о гидравлической крупности слагающих их частиц.

Размер частиц наносов является не совсем точным параметром. Это может быть наименьший размер ячейки сита, через которое частица сможет пройти, диаметр круга с площадью, равной максимальной проектируемой площади частицы, диаметр сферы с объемом или скоростью оседания такой же, как у частицы, или просто наибольший поперечный ее размер. Традиционно размер частиц выражается в миллиметрах. Так, в табл. 1.10 представлена классификация по Караушеву [1969]. В ней используется показатель геометрического размера частиц – средний линейный размер (d), соответствующий диаметру

Таблица 1.10. Классификация наносов (средний диаметр в мм) по: [Караушев, 1969]

Фракции	Валуны	Галька	Гравий	Песок	Пыль	Ил	Глина
Крупные	1000–500	100–50	10–5	1,0–0,5	0,1–0,05	0,01–0,005	< 0,001
Средние	500–200	50–20	5–2	0,5–0,2	–	–	
Мелкие	200–100	20–10	2–1	0,2–0,1	0,05–0,001	0,005–0,001	

равновеликого шара. Выделено 7 фракций: глина, ил, пыль, песок, гравий, галька, валуны.

За рубежом для классификации наносов часто используются шкалы параметра «фи» (ϕ), представляющие собой отрицательный логарифм (по основанию 2) размера частицы в мм (табл. 1.11).

Таблица 1.11. Классификация размеров частиц наносов по: [Brakensiek et al., 1979]

Тип отложений	Размер, мм	ϕ
Валуны очень большие	4096–2048	От -12 до -11
Большие	2048–1024	От -11 до -10
Средние	1024–512	От -10 до -9
Мелкие	512–256	От -9 до -8
Булыжники большие	256–128	От -8 до -7
Мелкие	128–64	От -7 до -6
Гравий очень крупный	64–32	От -6 до -5
Крупный	32–16	От -5 до -4
Средний	16–8	От -4 до -3
Мелкий	8–4	От -3 до -2
Очень мелкий	4–2	От -2 до -1
Песок очень крупный	2–1	От -1 до 0
Крупный	1–0,5	0–1
Средний	0,5–0,25	1–2
Мелкий	0,25–0,125	2–3
Очень мелкий	0,125–0,0625	3–4
Ил крупный	0,0625–0,0312	4–5
Средний	0,0312–0,0156	5–6
Мелкий	0,0156–0,0078	6–7
Очень мелкий	0,0078–0,0039	7–8
Глина крупная	0,0039–0,0020	8–9
Средняя	0,0020–0,0010	9–10
Мелкая	0,0010–0,0005	10–11
Очень мелкая	0,0005–0,00024	11–12

Определение размеров и типа русловых отложений в поле выполняется с помощью глазомерной съемки, простых инструментов и приспособлений. На участках горных рек с относительно однородным покрытием на глаз определяется процент отложений по грациям (табл. 1.10). Затем измеряются средние размеры 20–30 типичных образцов каждой грации по данным трех взаимно перпендикулярных поперечников *A*, *B* и *C* (рис. 1.42) валунов или крупной гальки с помощью линейки, а мелкой гальки и гравия – более точного прибора штангенциркуля.

Следует отметить, что оси *A* и *B* представляют собой соответственно длинную и короткую стороны наибольшего поперечного сечения образца и ось *A* не есть наибольшее расстояние (поперечник) между углами (рис. 1.42). На участках рек с неоднородными по составу валунно-галечными отложениями хорошие результаты дает решетка 1 м² с проволочными (или из другого материала) квадратными ячейками по 10 или 20 см. Решетка ориентируется верхним концом вверх по течению. Измерения типичных образцов отложений производятся обычным способом, по ячейкам оценивается площадь распространения тех или иных фракций отложений. Хорошие результаты дает фотографирование решетки сверху так, чтобы снимок был параллелен поверхности и решетка на фотографии была строго квадратной.

При фотографировании на угол решетки кладут хорошо читаемую карточку с информацией о данном месте и условиях съемки. Из технических деталей съемки нужно учесть, что короткофокусный объектив искажает размеры на периферии снимка, поэтому следует использовать фокусное расстояние больше среднего (не менее 70 мм в эквиваленте кадра 24 × 36) и возможно высокое положение камеры над решеткой. Мелкие отложения отбираются в бьюксы и другие емкости, в том числе и с ненарушенной структурой, как с поверхности, так и на необходимой глубине (с помощью буров и пробоотборников) для последующего лабораторного анализа. Во всех случаях образцы аккуратно подписываются и тщательно документируются в полевом журнале. Так как

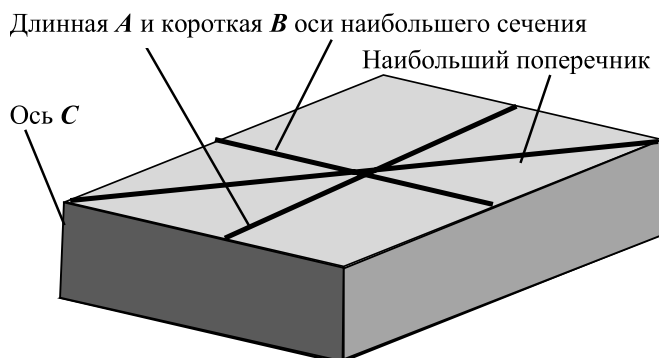


Рис. 1.42. Главные размеры модели плоской калки. Из: [Gordon et al., 2004]

и донные отложения, и наносы состоят из смеси частиц различного размера, при лабораторных исследованиях их подразделяют на заранее установленные интервалы крупности, которые обычно называют *фракциями*.

Данные о размере отложений (гранулометрический состав) могут быть количественно охарактеризованы рядом параметров, например преобладающим размером частиц, долей каждой группы размеров (фракций), интегральной (кумулятивной) кривой, статистическими параметрами кривой распределения размеров и др. Результаты исследований состава наносов и отложений чаще всего ранжируются, например, в убывающем порядке и изображаются графически в виде гистограммы, чтобы показать долю (в % массы) каждой фракции и общий вид распределения. Гистограмма может быть преобразована в интегральное распределение (кумулятивная кривая) с горизонтальной осью X размеров частиц в мм (в логарифмическом масштабе) и осью Y в % массы, показывающей долю частиц крупнее (или мельче, если выборка ранжирована в возрастающем порядке) данного размера.

Из данных массовых измерений может быть рассчитана вероятность появления определенной фракции P_d (в %) как отношение числа образцов m больше (или меньше) определенного размера d_m к общему числу образцов n , т.е. $P_d = (m/n) \cdot 100$ %. Так как выборка предварительно ранжировалась, то число m представляет собой ранг от 1 до n . Результаты наносятся на график: на ось X (в логарифмическом масштабе) размер d_m , на ось Y – соответствующая d_m величина P_d . Часто эмпирические данные укладываются в логарифмически нормальное распределение с двумя параметрами: математическое ожидание $lg(d)$ и коэффициент вариации C_v . Несмотря на то что вероятностные оценки наиболее объективны [Гришанин, 1979], на практике большее распространение получили кумулятивные кривые гранулометрического состава, показывающие на вертикальной оси Y процентное содержание каждой фракции в общей смеси наносов, например d_{50} , d_{95} и др. (рис. 1.43). На горизонтальной оси X отложены десятичные логарифмы среднего диаметра каждой фракции, выраженной в микрометрах. На графике удвоенный логарифм среднего диаметра фракции, т.е. $2lg(1000d_{cp})$, практически совпадает с порядковыми номерами фракций.

Гончаров [1962] отмечает, что все разнообразие размерного состава наносов и отложений сводится к следующим типам. Однородный состав в виде одной фракции (на верхнем рисунке две прямые с номером 1, представляющие песок мелкий и гальку мелкую). Равнофракционный состав с одинаковой долей каждой фракции (на верхнем рисунке две прямые под номером 2). Крупнофракционный состав с преобладанием в смеси крупных фракций (на верхнем рисунке две кривые под номером 3). Мелкофракционный состав с преобладанием мелких фракций, который наиболее характерен для речных наносов (на верхнем рисунке две кривые под номером 4). Среднефракционный состав с преобладанием в смеси средних фракций (на среднем рисунке пять кривых

под номером 5). Краефракционный состав с преобладанием и мелких, и крупных фракций (на нижнем рисунке две кривые под номером 6). При описании неоднородных донных отложений Караушевым рекомендуется также следующая классификация (табл. 1.12). По ней можно определить и тип грунта.

Существенное значение при решении теоретических и практических задач имеет такая характеристика, как *физическая плотность* горных пород, из которых состоят частицы наносов или отложений (грунта), $\rho_{гр}$. Плотность представляет собой *массу* сухого вещества в единичном плотно

заполненном (без пор и других веществ, например воды) объеме и может выражаться в $г/см^3$, $кг/м^3$ или в $т/м^3$ и обычно устанавливается пикнометрическим методом [Гаркуша, Яцюк, 1975]. Так, плотность кварцевого песка составляет около $2650 кг/м^3$, для сравнения плотность воды при $4^\circ C - 1000 кг/м^3$. В почвоведении применяется также понятие *удельный вес* почвы (грунта) как отношение веса твердой фазы в сухом состоянии к весу равного количества объема воды при температуре $4^\circ C$. Некоторые значения этой характеристики для основных составляющих почв приведены в табл. 1.13. При описании отложений рассматривается их *объемный вес* $\gamma_{гр}$, представляющий собой вес единицы объема грунта в ненарушенном состоянии, т.е. с порами, заполненными водой и/или воздухом. Он всегда меньше удельного веса из-за наличия пор в отложениях. Ориентировочные значения $\gamma_{гр}$ для слежавшихся грунтов приведены в табл. 1.12.

В этой связи вводится понятие *относительной плотности* как отношение объема безпустотной породы к объему грунтов и наносов вместе с порами в свежих отложениях. Значение относительной плотности зависит от крупности

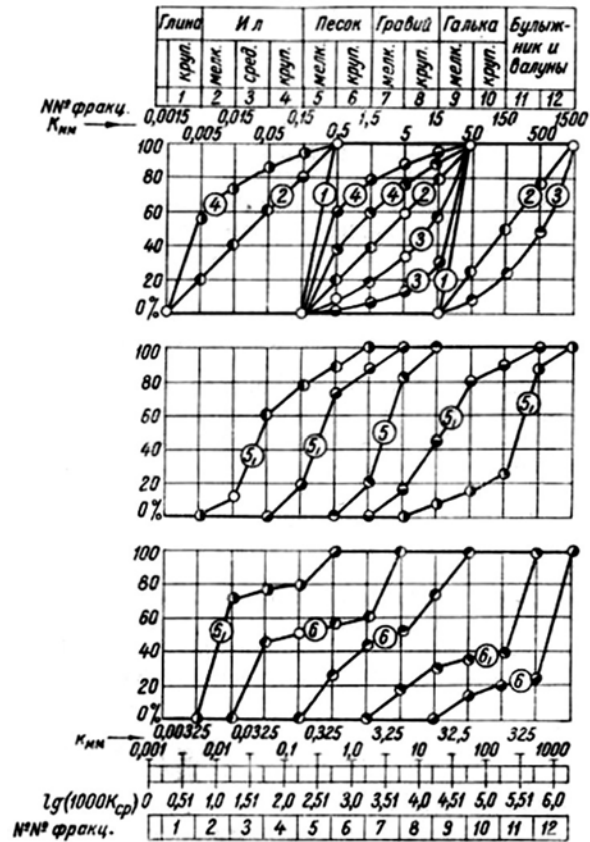


Рис. 1.43. Типы русловых наносов и грунтов. На графике в авторской редакции диаметры частиц d обозначены буквой k . Из: [Гончаров, 1962, рис. 33]

Таблица 1.12. Объемные веса донных отложений в зависимости от их гранулометрического состава по: [Караушев, 1969]

Фракция	Диаметр частиц, мм	Пределы содержания фракций, % по весу различных грунтов										
		Илы тонкие	Илы	Илы с примесью песка	Мелкие пески заиленные	Средние пески заиленные	Мелкие пески	Средние пески	Средние и крупные пески	Пески с гравием	Гравий	Галька с гравием
Галька	50–20											40–70
	20–10										10–20	
Гравий	10–5											20–40
	5–2									20–40	40–70	
	2–1											
Песок	1–0,5										10–20	
	0,5–0,2					20–40	40–70	10–20	40–70	40–70		
	0,2–0,1			10–20		40–70		40–70	20–40			
Пыль	0,1–0,05				40–70							
	0,05–0,01	10–20	20–40				20–40	20–40				
Ил	0,01–0,005			40–70	10–20	10–20	10–20					
	0,005–0,001	40–70	40–70	10–20								
Глина	< 0,001	10–20										
Объемный вес γ , т/м ³		0,7–0,8	0,8–0,9	0,9–1,1	1,1–1,2	1,1–1,2	1,3–1,5	1,5–1,6	1,6–1,7	1,7–1,8	1,8–2,1	2,0–2,4

Таблица 1.13. Удельный вес (г/см³) некоторых минералов и пород по: [Гаркуша, Яцюк, 1975]

Порода (минерал)	Удельный вес	Порода (минерал)	Удельный вес
Аллофан	1,58–1,89	Мусковит	2,76–3,0
Гипс	2,3	Биотит	2,80–3,27
Монтмориллонит	2,5	Базальт	3,0
Каолинит	2,58–2,63	Роговые обманки	3,0–3,3
Кварц	2,65	Апатит	3,17–3,27
Ортоклаз	2,54–2,58	Лимонит	3,5–4,0
Гранит	2,7	Гетит	4,0–4,4
Кальцит	2,71–2,72	Гематит	4,5–5,3

частиц, определяющей «плотность упаковки» отложений в объеме, и изменяется для свежих не слежавшихся отложений от 0,15 до 0,25 для крупных глин до 0,7 у песков и песчано-гравийных смесей [Гончаров, 1962]. В почвоведении сходной характеристикой служит так называемая *общая пористость* (или порозность) p , вычисляемая по формуле $p = (1 - \gamma_{гр}/\rho_{гр}) \times 100$ [Gordon et al., 2004].

В отечественной литературе наносы принято подразделять на *взвешенные* и *влекомые* [Караушев, 1969], в зарубежной литературе к ним прибавляются так называемые *смываемые* наносы [Gordon et al., 2004]. Подразделение наносов в реке показано на рис. 1.44.

«Смываемые» наносы (washload) – это мельчайшие частицы, преимущественно глины, илы и тонкие пески, которые легко переносятся потоком во взвешенном состоянии. Эти наносы смываются водой с берегов и прибрежных территорий и переносятся со скоростью течения. Требуются малые скорости течения и слабая турбулентность, чтобы они находились во взвешенном состоянии, поэтому они практически никогда не оседают. Их концентрация постоянна по глубине потока. Размер частиц этих наносов определяют как половину микрометра (0,00005 мм) с тем, чтобы отделить их от растворенных веществ. Наибольший размер обычно ограничивается 0,0625 мм. Содержание «смываемых» наносов в воде определяет скорость их поступления с прилегающих территорий и берегов, а не способность реки их переносить. По теории, реки имеют практически неограниченную способность для транспортировки смываемых наносов и не становятся перенасыщенными, как они могут быть перенасыщены, например, более крупными взвешенными наносами или растворенными веществами. «Смываемые» наносы составляют значительную долю общего объема и массы переносимыми реками наносов.

Взвешенные наносы переносятся вместе со смываемыми наносами, оставаясь во взвешенном состоянии в течение заметного промежутка времени. Они поддерживаются выталкивающей силой жидкости и турбулентными вихрями, но быстро оседают, когда скорости течения падают. На вертикальном профиле их концентрация наиболее высока у дна. Влекомые наносы

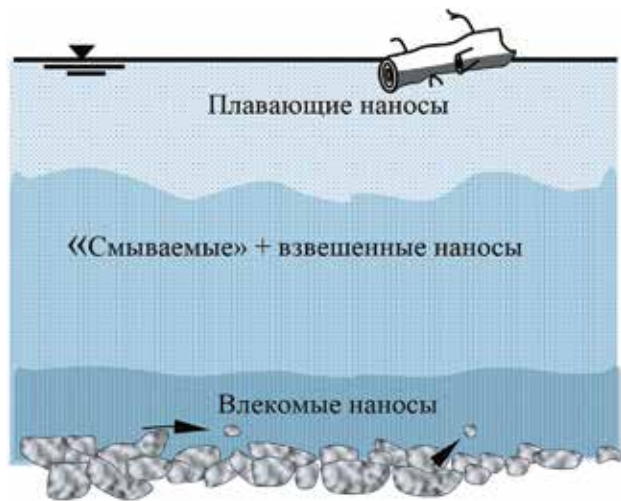


Рис. 1.44. Структура суммарного расхода наносов в реке. Из: [Gordon et al., 2004]

перемещаются перекачиванием, скольжением или «прыжками» (сальтацией) и значительное время имеют контакт с дном, поэтому транспортируются в узкой области у дна реки (рис. 1.44).

Наносы, покрывающие дно потока, называются «донные наносы», или «донные отложения». Как отмечает Караушев [1969], нельзя смешивать понятия донные наносы и речной аллювий, так как последнему принадлежат и более глубокие слои рыхлых отложений, которые в современных условиях не принимают участие в формировании наносов и русловых форм. Для приближенной оценки взвешенные наносы отделяются от влекомых по пороговому значению размера частиц, равному приблизительно 0,0625 мм, но очевидно, что на крутых каменистых реках фракции песка такого размера могут находиться во взвешенном состоянии.

Растворенный (химический) сток. Этот тип стока представлен веществами, переносимыми в растворенном виде. Местные геологические условия, землепользование и процессы выветривания влияют на растворенный сток, который часто может превышать общий вес речных наносов. Естественным источником химических веществ служат соли океана, растворенные в речной воде прибрежных районов, и химическое выветривание горных пород, иногда усиленное органическими кислотами из разлагающихся растительных остатков. В целом, подземные воды равнинных территорий имеют более высокую концентрацию растворенных веществ, чем поверхностный склоновый сток. Химический состав воды в трещинах горных пород с интенсивным водообменом мало чем отличаются от химического состава местных речных вод за исключением вод минерализованных источников.

Растворенный сток существенно изменяется от реки к реке, в среднем около 38 % суммарного твердого стока рек в мире представлено растворенным стоком [Алекин, 1970]. Из-за турбулентности растворенный сток равномерно распределяется по сечению русла. Исключения существуют в отдельных областях морских устьев рек со слоистой солевой структурой и на участках выхода подземных вод с высоким содержанием растворенных веществ. Химический сток меняется с изменением расхода воды. В паводок концентрации веществ в воде вначале снижаются, когда дождевые воды разбавляют речную воду, а затем увеличиваются из-за уменьшения разбавления [Алекин, 1970].

Схематическое распределение концентрации наносов разного типа показано на рис. 1.45. Частицы большего размера перемещаются преимущественно у дна в качестве влекомых наносов, самые мелкие частицы, представляющие «смываемые» наносы, распределены более или менее равномерно от дна до водной поверхности. Концентрация взвешенных наносов растет от водной поверхности ко дну. Реальное распределение содержания наносов на вертикали зависит от размера частиц, скорости и интенсивности турбулентности. Основное количество наносов и наиболее крупные фракции транспортируются

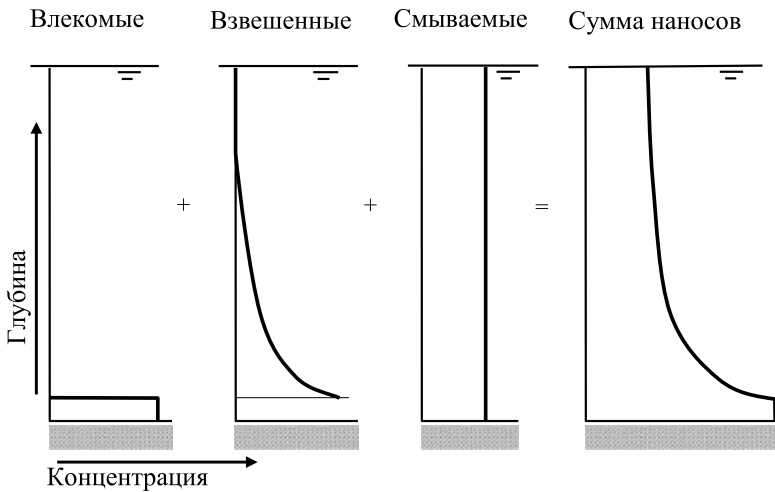


Рис. 1.45. Схематическое распределение концентрации наносов по глубине.
Из: [Gordon et al., 2004]

в области наибольших скоростей, которые не всегда совпадают с тальвегом (линией наибольших глубин). Если скорости и турбулентность увеличиваются, то крупные частицы наносов будут распределены более равномерно по живому сечению.

Расход наносов – это их количество, перемещающееся через поперечное («живое») сечение реки за временной интервал. Он обычно выражается в единицах массы за единицу времени: в кг/с и т/сут или год. Вертикальное и горизонтальное изменение концентрации наносов и скоростей течения воды определяет распределение расхода наносов в живом сечении. Это распределение должно быть взято в расчет при отборе проб наносов.

Ход мутности воды и расход наносов во времени не обязательно совпадут с динамикой стока. В начале сильных дождей рыхлый материал легко выносятся из области размыва с поверхностным ручейковым стоком в реку. По мере прекращения осадков и/или исчерпания запасов отложений этот приток быстро падает. Мутность воды в реках обычно выше на фазе подъема уровня, как только уровень спадет, грубые частицы откладываются на дне и поток осветляется. Это ведет к нарушению связи расходов воды с мутностью и расходом наносов.

Распределение концентрации суммарного твердого стока не дает общей картины, так как соотношение составляющих будет меняться со временем. Смываемые наносы имеют высокие концентрации до пика паводка. Концентрация взвешенных и интенсивность перемещения влекомых наносов увеличиваются при повышении расхода до максимума, как только расходы воды снижаются, происходит сокращение размера частиц в потоке. Наносы также имеют тенденцию различаться при снеготаянии и дожде. Количество поступающего

в реку рыхлого материала зависит от большого числа факторов, среди которых расчлененность рельефа и крутизна склонов, строение и состав почв и грунтов, в том числе защищенность их растительностью, площади распаханых земель, величина стока и его изменчивость [Караушев, 1969]. В этой связи реки могут рассматриваться или как ограниченные в запасах рыхлых отложений в бассейне, или как ограниченные в эрозионной и транспортирующей способности [Gordon et al., 2004].

Для многих водных организмов речное русло служит средой обитания, местом размножения и выращивания потомства, средством для измельчения пищи или защитой от разрушительного воздействия паводков [Statzner et al., 1988]. В инженерной практике речное русло обычно рассматривается как граница между твердой поверхностью и жидкостью. Для многих организмов эта граница часто различается. Поверхность дна богата органическим веществом, задержанным в углублениях и между обломочным материалом, которое доступно организмам на низшей цепи питания. Ниже этой поверхности формируется область взаимодействием между потоком и подземными водоносными системами. Эта область может быть активна биологически. Многие организмы поселяются временно в промежутках между отложениями, в то время как другие могут вести свой жизненный цикл под камнями на дне [Богатов, 1994; Hynes, 1970]. Таким образом, распределение размеров отложений вдоль реки будет одним из физических факторов среды обитания, влияющих на распределение организмов. Отмечается [Gore, 1985], что наибольшая продуктивность и плотность водных беспозвоночных чаще встречаются на волнистой поверхности с булыжниками среднего размера и гравелистым субстратом. Площади, покрытые смещающимися песками, в целом имеют сокращенное разнообразие особей [Minshall, 1984].

Биологическая активность на грубом субстрате зависит от интенсивности движения воды между элементами отложений для смены питательных элементов и обеспечения притока кислорода и удаления продуктов метаболизма. Если избыточное количество тонких отложений поступит в реку, например с дорог или из-за ремонта земляных плотин, они могут сформировать «ковёр» на поверхности грубообломочных донных отложений. Тонкие отложения проникают между грубыми частицами горной породы, что может сократить поток воды, прекратить доступ кислорода к икринкам, это ограничит нерестовую продуктивность участка и станет причиной массовой гибели мальков. На реках с чистыми песчано-гравийными донными отложениями, которые внезапно заполняются илом, может произойти замена поденок и ручейников на личинки двукрылых, которая, в свою очередь, может повлиять на состав рыб [Milhous, 1982]. Эти экологические эффекты важны в оценке стока, требующегося для создания промывного режима и удаления тонких отложений из русла.

Транспорт частиц различных веществ являются и вредом, и пользой для водных организмов. Приносимые течением частицы органического вещества – источник пищи для донных организмов. Однако когда поток ослабевает, крупные минеральные частицы оседают на дно и могут причинить вред биоте. Тонкие пески и глины забивают жабры водных обитателей как особый «смог», сокращают поступление света для фотосинтеза и продукции перифитонов и смешиваются с продуктами питания фильтрантов. Тяжелые металлы и другие токсичные вещества могут тоже быть адсорбированы тонкими отложениями и таким образом транспортироваться, а затем откладываться. Вогель [Vogel, 1981] считает, что переформирование дна и берегов в течение паводка имеет более критическое влияние на биоту, чем непосредственно скорость течения воды. Джовет и Ричардсон [Jowett, Richardson 1989] провели исследование на реках в Новой Зеландии, где популяция форели значительно уменьшилась после большого паводка, хотя огрубление субстрата, удаление чрезмерного роста водорослей и углубление ям улучшило условия обитания для будущего использования. Водная растительность, такая как ковровые заросли водорослей или микроскопические водоросли, будет повышать стабильность дна в течение высоких паводков.

Эрозия, транспорт и отложение наносов. Движение наносов включает три стадии: начало движения, транспорт и отложение. При малых расходах воды будут переноситься только «смываемые» наносы. Когда расход вырастет до определенной величины, более крупные и тяжелые частицы на дне и берегах начинают движение. Реки переносят наносы до тех пор, пока поток не потеряет свою энергию, и в это время начнется отложение наносов. Для влекомых наносов отложение происходит, когда они перестают перекачиваться, скользить или прыгать; для взвешенных наносов – когда частицы оседают из суспензии. Твердая частица в неподвижной воде будет оседать с постоянной скоростью, называемой гидравлической крупностью. Мелкие и менее плотные (легкие) частицы оседают медленнее, чем более крупные и тяжелые (более плотные). Из уравнения равномерного осаждения частиц в воде выведена формула гидравлической крупности в общем виде [Гришанин, 1979]:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_d}} \sqrt{\frac{2k_2}{k_1 \frac{\rho_s}{\rho - 1} g d}}, \quad (1.73)$$

где ω_0 – скорость оседания; ρ и ρ_s – плотности воды и частиц; C_d – коэффициент гидродинамического сопротивления; k_1 и k_2 – коэффициенты формы частиц (для шара $k_1 = \pi/2$, $k_2 = \pi/6$).

Коэффициент гидродинамического сопротивления C_d связан с числом Рейнольдса для частиц и их формой $Re_d = \omega_0 d / \nu$. По особенностям формы различаются следующие теоретические модели: шарообразная, эллипсоидная

и уплощенная (пластинчатая). Скорость потока, необходимая для подъема и транспорта наносов, может изменяться из-за количества наносов, уже находящихся во взвешенном состоянии. Мелкие взвешенные частицы сокращают турбулентность и таким образом уменьшают эродирующую силу текущей воды [Гришанин, 1979]. Байли и Вильямс [Bayly, Williams, 1973] приводят данные, которые показывают, что скорость потока, требуемая для транспорта глин в грязной воде, в 1,7 раза больше, чем в чистой. Из-за того, что мелкие частицы увеличивают плотность и вязкость воды, более крупные частицы оседают медленнее, как если бы они оседали в чистой воде.

Армирование (укрепление) речного дна (отмостка). В руслах рек часто формируется естественное укрепление дна реки, которое представляет собой плотно уложенный каменистый слой, подстилаемый более мелкими отложениями (рис. 1.46, 1). Он защищает нижележащие отложения от размывания и перемещения до тех пор, пока сам не разрушится. Армирование происходит не всегда, например, оно не встречается на «ветвящихся» реках [Маккавеев, Чалов, 1986]. Иногда такой слой присутствует не по всему руслу, а только на отдельных участках, где вымывание более сильное. На некоторых площадях отмостка формирует эрозионно-устойчивое русло, которое переформируется только во время высоких паводков.

Показатель длины армированного слоя (A) может быть определен как отношение размера фрагментов армированного слоя к размеру фракций под его поверхностью ($A = d_a/d_{\text{под}}$), где d_a – размер фракции армированного слоя d_{50} , $d_{\text{под}} - d_{50}$ фракции слоя под его поверхностью. Величина A обычно находится между 1,5 и 3 в гравийных руслах, достигая 1,0, если мелкие отложения покрывают дно реки [Parker et al., 1982]. Влияние армирования должно учитываться

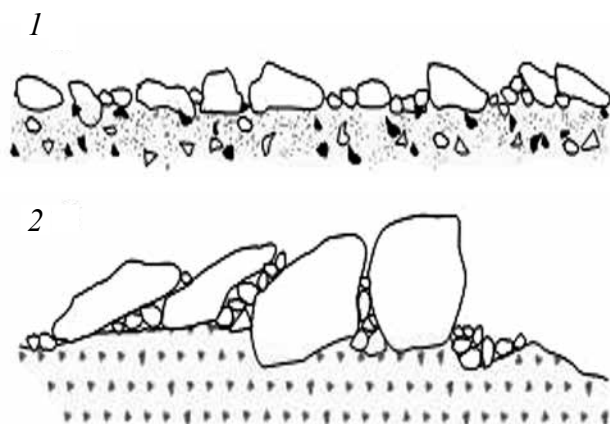


Рис. 1.46. Распределение на донной поверхности материала: армирование крупными обломками мелкозернистых рыхлых отложений (1) и черепицеобразное наслоение (2). Из: [Gordon et al., 2004]

не только в прогнозах транспорта наносов, но и при отборе проб наносов.

Поток (рис. 1.47) оказывает давление на неподвижную частицу, формируя подъемную силу $F_{\text{п}}$ и силу лобового напора $F_{\text{лн}}$, стремясь оторвать ее от дна. Потoku оказывает сопротивление сила сцепления частицы с поверхностью дна, обусловленная силами трения $F_{\text{тр}}$ и тяжести $F_{\text{тж}}$, а также некоторыми другими, например электростатическими

силами, вакуумного присасывания (для илов и глин); как отмечалось ранее, частица может быть прикреплена к дну донными организмами; крупная частица может опираться на другие фрагменты отложений и т.п.

Русловые отложения представляют собой смесь частиц различной крупности. В этой связи Гончаров [1962] предлагает действующую высоту выстугов определять по наиболее крупным частицам d_s , доля которых в смеси составляет около 5 %.

При этом критическая несдвигающая скорость будет определяться формулой:

$$V_{\text{несдв}} = \lg \frac{8,8h}{d_s} \sqrt{2g(\gamma_1 - \gamma)d_{\text{ср}}}, \quad (1.74)$$

где $V_{\text{несдв}}$ – несдвигающая скорость, м/с; h – глубина потока, м; d – диаметр частиц, м; $(\gamma_1 - \gamma)$ – разница удельного веса зерен и воды; $d_{\text{ср}}$ – средняя крупность смешанного состава.

Срывающая скорость выражается следующим соотношением:

$$V_{\text{ср}} = 1,41 V_{\text{несдв}}. \quad (1.75)$$

В работе Алексеевского [2006] приводятся и другие формулы расчета несдвигающей скорости, например формула Шамова:

$$v_n = 4,6 d^{1/3} h^{1/6} \quad (1.76)$$

и И.И. Леви для глубин более $60 d_{\text{вл}}$:

$$v_n = 1,4(gd_{\text{вл}})^{0,5} \lg(12h/d_s), \quad (1.77)$$

обозначения, как в формуле (1.74).

Разрабатывая модель распределения возможных мест обитания биоты в реках Новой Зеландии, Джовет и Ричардсон [Jowett, Richardson, 1989] отмечали, что пригодность речного дна для флоры и фауны зависит от его стабильности. Они определяют понятие *относительная стильность дна (RBS)* как отношение скорости (в м/с), требуемой только для начала движения частицы (V_n), к действительной или прогнозируемой скорости у дна ($V_{\text{дон}}$):

$$RBS = \frac{V_n}{V_{\text{дон}}}. \quad (1.78)$$

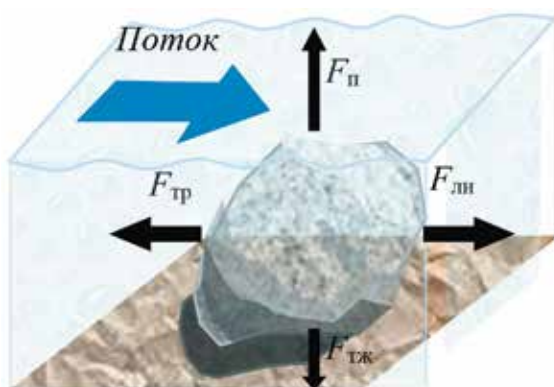


Рис. 1.47. Силы, действующие на донные отложения. Обозначения в тексте

V_n они определяют по простой формуле для частиц однородного размера более 1 мм:

$$V_n = 0,155 \sqrt{d}, \quad (1.79)$$

где d – средний диаметр частиц, мм, а

$$V_{\text{дон}} = 0,7V, \quad (1.80)$$

где V – средняя скорость потока, м/с.

В расчетах часто используют предположение, что при критическом значении касательных напряжений частицы донных отложений приходят в движение. При выводе уравнения критического касательного напряжения предполагается, что когда частица только готова к движению (начальное движение) касательные силы опрокидывания уравновешивают вес погруженной частицы, которая удерживала ее на месте. Приравнявая две силы на момент начала ее движения, можно получить уравнение для критического касательного напряжения:

$$\tau_k = \theta_k g d (\rho_{\text{гр}} - \rho_{\text{в}}), \quad (1.81)$$

где τ_k – критическое касательное напряжение, н/м²; d – репрезентативный размер частиц, м; g – ускорение силы тяжести; $\rho_{\text{гр}}$ и $\rho_{\text{в}}$ – плотность соответственно частиц и воды, кг/м³. Безразмерная константа θ_k является функцией формы частиц, свойств жидкости и распределения частиц на поверхности. Ее принято называть *безразмерным критическим касательным напряжением* [Gordon et al., 2004]. Уравнение (1.81) впервые было предложено американским инженером Шильдсом в 1936 г. Он связал θ_k с другой безразмерной характеристикой – числом Рейнольдса Re_* для «гранул» ($Re_* = v_* k / \nu$). Кривая Шильдса показывает зависимость между θ_k и Re_* (рис. 1.48).

Для $\theta_k \approx 0,06$ при плотности отложений около 2650 кг/м³ уравнение (1.81) принимает вид:

$$\tau_k = 0,06 \times 9,807 \times d \times (2650 - 1000) \quad (1.82)$$

или

$$\tau_k = 970d \quad (1.83)$$

со значением d в метрах или

$$\tau_k = 0,97d \quad (1.84)$$

со значением d в миллиметрах.

Таким образом, критическое касательное напряжение, требующееся, чтобы сдвинуть частицу (в н/м²), примерно то же, что и диаметр частицы в миллиметрах. Ряд значений θ_k для русел рек с различными отложениями приведены в табл. 1.14.

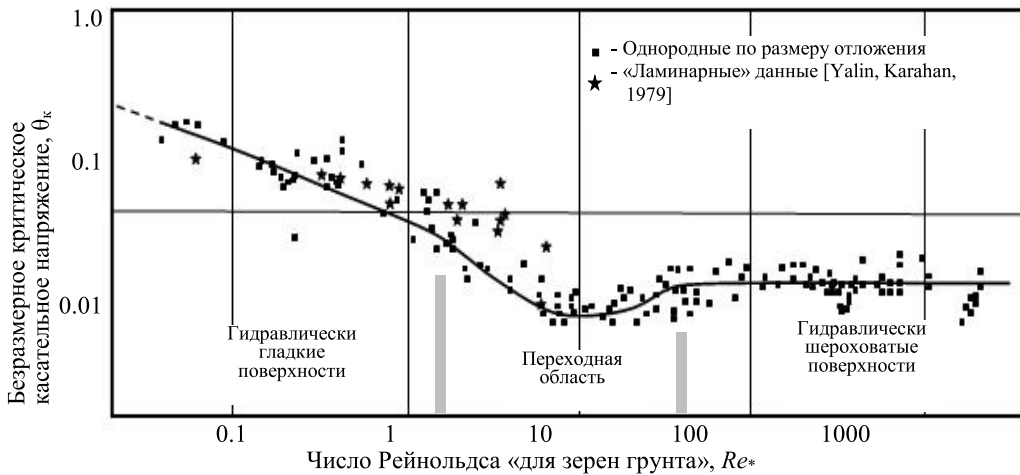


Рис. 1.48. «Кривая Шильдса», показывающая зависимость между безразмерным критическим напряжением θ_k и числом Рейнольдса для зерен грунта Re_* . Остальные обозначения в тексте. Из: [Gordon et al., 2004]

Влиянию армирования русла на параметр Шильдса посвящены работы [Parker et al., 1982; Milhous, 1986; Milhous et al., 1989]. Для укрепленных таким образом русел они рекомендуют использование d_{50} для армированного слоя в уравнении (1.78). Из исследований на р. Оак в штате Орегон, США, Милхаус [Milhous, 1986] обнаружил смыв тонких частиц, отложенных среди армирующего слоя, когда величина касательного напряжения была достаточна для разрушения даже малой части крупных отложений. Он рекомендовал две величины θ_k : 0,021 для тонких смываемых отложений и 0,035 при смешении около 30 % армированного слоя и залегающих глубже тонких отложений.

Сток наносов с водосбора. Сток наносов определяется как суммарный их расход за единицу времени, обычно год. Он может быть рассчитан по данным измерений взвешенных и влекомых наносов или оценен по зависимостям между стоком наносов и расходом воды. Количество наносов, поступающих к нижнему

Таблица 1.14. Величины параметра Шильдса θ_k для смешанных отложений по: [Gordon et al., 2004]

Состояние русла	θ_k
Плотно упакованные «плывуны» и гравий с большими пустотами, заполненными водой	0,01–0,035
Нормальные однородные отложения или устойчивые русла со случайными включениями зерен	0,035–0,065
Плотно упакованные с заполнением пустот тонкозернистыми материалами между крупными частицами	0,065–0,10
Плотно наложенные друг на друга (отмостка, АФ)	> 0,10

створу, представляет собой баланс между количеством наносов накопленных в русле и принесенных с верховьев, а также попавших в реку вследствие размыва русла и берегов. Большая часть притока наносов определяется периодическим размывом аллювиальных отложений. Относительный вклад наносов из русла и нерусловых источников изменяется с размером водосбора и его трудно оценить. В целом, крутые и короткие склоны верховьев рек поставляют большую часть склоновых отложений. Ниже по течению увеличивается отложение эродированного материала и начинает преобладать русловая эрозия [Маккавеев, Чалов, 1986]. В табл. 1.15 приведены средние годовые расходы твердого стока для некоторых больших рек мира. В целом у рек в засушливых районах изменчивость стока наносов больше, чем в районах с достаточным увлажнением [Nordin, 1985; Маккавеев, Чалов, 1986]. На реках с высокой изменчивостью стока транспорт наносов происходит обычно в течение всего нескольких дней с наибольшими расходами воды. Концентрация наносов в воде также высока в начале снеготаяния или первого в году дождевого паводка, когда имеется много эродированного и еще не смытого материала на поверхности водосбора. Следующие затем паводки несут все меньше и меньше наносов за общий период стока.

Сток наносов также меняется от года к году. Изменения в количестве переносимых наносов в течение мало- и высоководных лет может иметь значительное влияние на условия обитания организмов и водной растительности на речном дне. Велика изменчивость стока наносов в различных природных зонах и ландшафтах. Она определяется главным образом эрозионной устойчивостью территории и климатом. Полевые методы сбора и анализа взвешенных, влекомых наносов и растворенных веществ будут рассмотрены в разделе 1.3. Суточные концентрации наносов, опубликованные в справочных изданиях Росгидромета, являются обычно мгновенными значениями мутности, полученными из образцов, отобранных в одно и то же время суток, реже средней концентрацией

Таблица 1.15. Годовой сток наносов некоторых крупных рек, измеренный в устье

Река	Среднегодовой сток $\times (10^6 \text{ т})$
Амазонка, Бразилия	498
Конго, Конго	65
Ориноко, Венесуэла	87
Янцзы, Китай	500
Брахмапутра, Бангладеш	726
Миссисипи, США	312
Меконг, Таиланд	170
Парана, Аргентина	82
Святой Лаврентий, Канада	4
Ганг, Бангладеш	1450
Нил, Египет	111
Мюррей-Дарлинг, Австралия	32

за сутки, полученной по нескольким сериям отбора проб. Обычно пробы мутности отбирают вместе с измерением расхода воды, а в промежутках между измерениями расхода воды берут единичные пробы в одной точке створа.

На больших реках, где концентрация наносов слабо меняется в течение дня, единичные пробы пригодны для расчета суточных расходов взвешенных наносов по формуле:

$$Q_{\text{в.н}} = 0,0864Q \times C, \quad (1.85)$$

где $Q_{\text{в.н}}$ – суточный расход взвешенных наносов, т/сут; Q – среднесуточный расход воды, м³/с; C – среднесуточная концентрация наносов, мг/л. Константа 0,0864 переводит секунды в дни и миллиграммы в тонны. Количество наносов рассчитывается для каждого временного интервала по уравнению:

$$((Q_{\text{в.н}} \text{ в момент 1}) + (Q_{\text{в.н}} \text{ в момент 2}))/2 \times (\text{время 2} - \text{время 1}). \quad (1.86)$$

Суточные расходы наносов в т/сут могут затем рассчитываться суммированием величин за отдельные интервалы в течение суток. Следует отметить, что та же процедура применяется для оценки расхода растворенных в воде веществ.

Расход влекомых наносов ($Q_{\text{вл}}$) оценивается из их количества за некоторую единицу времени. По данным отбора проб батометрами и другими приспособлениями или обследования естественных ловушек наносов определяется масса наносов, захваченных за определенный временной интервал (например, сутки, паводок, сезон, год). Затем выполняется фракционный анализ отобранных образцов для оценки расхода влекомых наносов для каждой фракции. Если измерен объем, то он вначале должен быть преобразован в массу через объемную плотность отложенных наносов.

С использованием отечественного батометра Полякова или его зарубежных аналогов расход влекомых наносов на единицу ширины потока $Q_{\text{вл}}$ в кг/(м·с) для каждой измеряемой точки рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{вл}} = M_i / W_i t, \quad (1.87)$$

где t – временной интервал отбора пробы, с; M – масса, кг; W – ширина приемного отверстия пробоотборника, м; i – номер точки измерения.

Так как по методу расчета расхода «скорость–площадь» каждое измерение характеризует часть поперечного сечения (частный расход), общий расход влекомых наносов для всего сечения рассчитывается умножением каждого измерения на величину временного интервала и суммированием по ширине реки. Концентрации наносов часто плохо связаны с расходом воды. Поэтому всегда предпочтительней измерять концентрацию наносов, чем пытаться оценить их по связи с речным стоком. Однако данные по наносам будут не всегда доступны в течение нужного года, сезона или интересующего паводка. Оценка концентрации наносов по данным о речном стоке – широко используемый подход в гидрологической практике. Расходы наносов, полученные одновременно

с измерением расходов воды, могут быть использованы для построения графика зависимости хода наносов от расхода воды (кривой наносов), предварительно описанной уравнением типа

$$Q_n = pQ^j, \quad (1.88)$$

где Q_n и Q – расходы соответственно наносов и воды; p и j – эмпирические коэффициенты. Величина j , которая не зависит от единиц измерения, обычно лежит между 1,5 и 3,0 [Knighton, 1984]. В работе Маккавеева и Чалова [1986] приводится зависимость Маккавеева для влекомых наносов:

$$R_d = AI^n Q^m. \quad (1.89)$$

Также Гончаров [1962] приводит уравнение Шамова, в котором расход влекомых наносов связан со средним диаметром донных отложений d_{cp} , скоростью v_{cp} и глубиной потока h :

$$R_d = k \left(\frac{v_{cp}}{v_n} \right)^3 (v_{cp} - v_n) \left(\frac{d_{cp}}{h} \right)^{1/4}. \quad (1.90)$$

Чтобы построить кривую наносов, их концентрации должны быть измерены вместе с большим числом расходов воды. Расход наносов рассчитывается по отдельным пробам, и строится зависимость расхода наносов от расхода воды в логарифмическом масштабе.

С помощью кривой наносов рассчитываются суточные, месячные или годовые расходы наносов по данным о речном стоке. Эти оценки могут быть использованы для определения годовых или сезонных объемов наносов, что может быть полезным при определении областей высокого (или низкого) стока наносов, нацеливания комплексных работ по предотвращению эрозии территории.

1.2. ИСТОЧНИКИ ДАННЫХ О РЕКАХ

Большое значение при изучении рек имеют ландшафтные характеристики бассейнов, морфометрия речных долин и русел рек, количественные данные о водном режиме и качестве вод. Источником информации о реках служат топографические карты, аэрофотоснимки и другие данные дистанционного зондирования Земли. Количественные характеристики водного режима и качества вод содержатся в многочисленных специализированных справочниках.

1.2.1. Топографические карты

Изображение участков поверхности Земли, имеющей в целом неправильную форму, на плоскую карту представляет собой сложную проблему. Чтобы математически описать эту поверхность, используется так называемый эллипсоид вращения с малым сжатием – *референц-эллипсоид* (рис. 1.49).

В нашей стране применяют эллипсоид ПЗ-90 (Параметры Земли 1990 г., Россия), в том числе и для спутниковой навигации ГЛОНАС. За рубежом широко распространена система WGS-84 (Мировая геодезическая система 1984 г., США) для спутниковой навигации GPS (http://ru.wikipedia.org/wiki/Земной_эллипсоид). В картографии земная поверхность часто рассматривается как правильная сфера.



Рис. 1.49. Эллипсоид вращения с малым сжатием

Масштабом карты называется степень уменьшения объектов на плоской карте относительно их размеров на земной поверхности (поверхности эллипсоида или шара). Различают *численный масштаб*, показывающий, во сколько раз длины на карте меньше соответствующих длин на местности, например 1 : 100 000, *линейный масштаб*, приводимый на полях карты в виде линейки, и *именованный масштаб*, указывающий, какое расстояние на местности соответствует 1 см на карте. По назначению выделяются *общегеографические*, *тематические* и *специальные карты*. Общегеографические карты имеют многоцелевое применение. На них, в зависимости от выбранного масштаба, отображаются все видимые объекты на местности. При этом карты масштаба крупнее 1 : 100 000 относятся к топографическим, от 1 : 200 000 до 1 : 1 000 000 – к обзорно-топографическим и мельче 1 : 1 000 000 – к обзорным [Берлянт, 2002]. Тематические карты применяют для изображения явлений и процессов в литосфере (геологические и геоморфологические карты), в атмосфере (синоптические и климатологические карты), в биосфере (карты распространения отдельных видов животных и т.п.) и других сферах. Специальные карты предназначены для навигации морского, воздушного, автомобильного транспорта, учета земель различного назначения (карты земельного и городского кадастра, лесного фонда) и других задач. В гидрологии и речной экологии применяют топографические карты с рельефом для локализации района исследований и расчета гидрографических характеристик рек.

Картографические проекции и системы координат. Картографическая проекция устанавливает соответствие между географическими координатами точек (с широтами φ и долготами λ) на сфере и их плоскими прямоугольными координатами (X и Y) на карте. Сферическую поверхность нельзя развернуть на плоскость карты без искажений расстояний (длин), площадей (форм) или направлений (углов). Таким образом, любая малая окружность на эллипсоиде

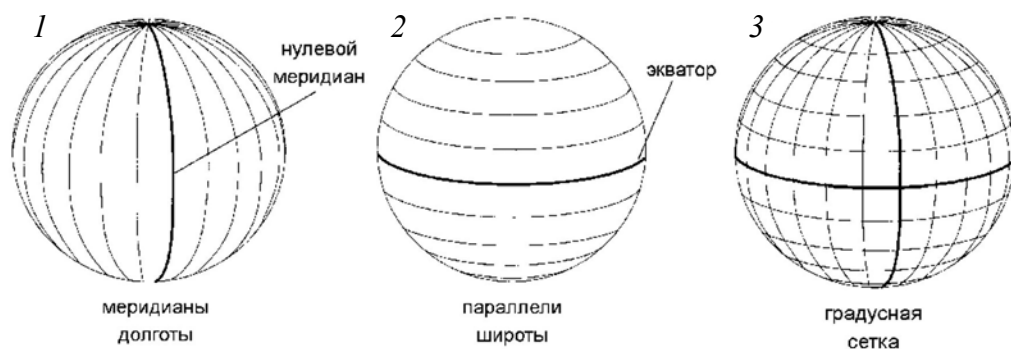


Рис. 1.50. Меридианы (1), параллели (2) образуют координатную сетку (3)

(шаре) будет выглядеть на карте эллипсом. На рис. 1.50 на эллипсоиде схематически показаны линии меридианов (1) и параллелей (2), образующие так называемую *координатную сеть* (3), или *географическую систему координат* (ГСК).

При этом отображение координатной сети на плоскость карты в некоторой проекции представляет собой *картографическую сетку*. ГСК основана на определении углов отклонения условной линии, проведенной через центр земли и определяемую точку, от нулевого меридиана и экватора. При этом широта (φ) есть угол между нормалью к поверхности эллипсоида в данной точке и плоскостью экватора. Долгота (λ) – двугранный угол между меридианом данной точки и начальным (Гринвичским) меридианом (рис. 1.51). Значения широты и долготы выражаются в угловых градусах, минутах и секундах. В географических информационных системах (ГИС) их часто выражают в десятичных граду-

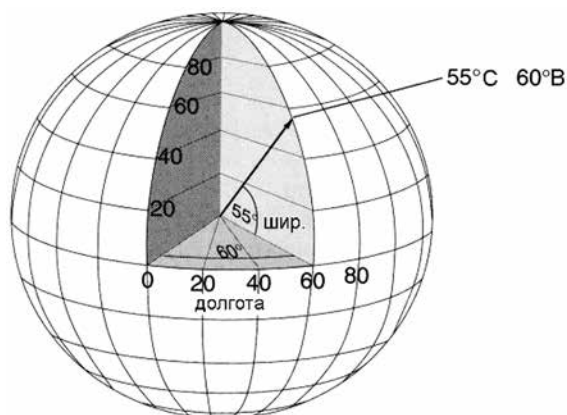


Рис. 1.51. Географическая система координат. Точка на поверхности шара, на которую указывает стрелка, имеет географические координаты 55° с.ш. и 60° в.д.

сах. При этом секунды и минуты выражают в долях градуса. Так, широта $42^\circ 30' 36,2''$ в десятичных градусах будет примерно равна $42,0 + 30/60 + 36,2/3600 \approx 42,0 + 0,5 + 0,010 \approx 42,51$. Для ГСК в качестве нулевого меридиана принят Гринвичский меридиан, проходящий через специальный знак в астрономической обсерватории в предместье Лондона, а в качестве нулевой параллели – экватор. Значения широты изменяются от 0° до 90° в Северном полушарии и от 0° до -90°

в Южном полушарии. Значения долготы меняются от 0 до 180° в Восточном полушарии и от 0 до -180° в Западном полушарии. На топографических картах нанесена сетка прямоугольных координат. Координаты измеряются от определенной начальной точки в метрах.

В картографии применяют *равновеликие проекции*, сохраняющие площади без искажений, *равноугольные* – оставляющие без искажений углы (направления), а также *равнопромежуточные проекции*, в которых неизменен масштаб расстояний (длин) по одному из главных направлений: меридианам или параллелям. Существуют так называемые *произвольные проекции*, в которых стремятся найти наиболее выгодное для избранного района распределение искажений [Берлянт, 2002]. Проекция создается с помощью воображаемых геометрических фигур, таких как *плоскость*, *цилиндр* или *конус*, на поверхность которых переносится изображение земной поверхности. Если оси цилиндра или конуса параллельны земной оси, а плоскость ей перпендикулярна, то такие проекции имеют добавочное название – *нормальные*. Ось Земли и оси геометрических фигур могут пересекаться и под другими углами, тогда это будут *косые* (азимутальные) проекции. Отсюда и названия проекций: *нормальные*, *азимутальные*, *поперечные цилиндрические*, *конические* и др. На практике чаще всего приходится иметь дело с равноугольными поперечно-цилиндрическими проекциями Гаусса-Крюгера и Меркатора, последняя носит название UTM (Universal Transverse Mercator). В обеих проекциях поверхность земного эллипсоида разделяют по меридианам на 60 зон по 6° долготы в каждой. Отличается только нумерация зон. Так, в проекции Гаусса-Крюгера нумерация шестиградусных зон начинается от первой зоны, примыкающей к нулевому Гринвичскому меридиану, а в проекции UTM – к меридиану 180° з.д. в обоих случаях с востока. Следовательно, номер n шестиградусной зоны проекции Гаусса-Крюгера связан с номером N зоны проекции UTM соотношением $n = N - 30$. Каждая шестиградусная зона имеет собственную систему прямоугольных координат. Центральный меридиан зоны называется осевым и принят за ось абсцисс x . Центральная параллель в зоне – экватор, совпадающий с осью ординат y . Левая полуось ординат имеет отрицательные значения, поэтому условились значение ординаты y осевого меридиана принимать равным 500 км. Так как значения координат повторяются в каждой зоне, то впереди приписывается номер зоны.

Номенклатура и оформление топографических карт. Номенклатура представляет собой систему упорядочивания карт различных масштабов. В нашей стране в основе номенклатуры лежит карта миллионного масштаба 1 : 1 000 000, которая делится меридианами и параллелями на трапеции размером $4 \times 6^\circ$. Ряды трапеций обозначаются заглавными буквами латинского алфавита от экватора к югу и северу начиная с буквы А. Колонны нумеруются цифрами с запада на восток (рис. 1.52). Первая трапеция начинается со 180° з.д. Листы (трапеции)

миллионной карты имеют номенклатуру, состоящую из буквы ряда и номера колонны, например, лист с изображением самой южной территории Приморского края имеет номенклатуру К-53 (рис. 1.52). Номенклатура листов карт более крупного масштаба формируется на основе карты миллионного масштаба. Так, лист карты масштаба 1 : 1 000 000 может делиться на 4 листа карты масштаба 1 : 500 000, которые обозначаются буквами: А, Б, В, Г. На этом же листе карты масштаба 1 : 1 000 000 укладывается 36 листов карты масштаба 1 : 200 000, обозначенные римскими цифрами: I, II ... XXXVI, или 144 листа карты масштаба 1 : 100 000, пронумерованные цифрами от 1 до 144.

Лист карты масштаба 1 : 100 000 делится меридианами и параллелями на 4 листа карты масштаба 1 : 50 000 (20" по широте и 30" по долготе), которые обозначаются буквами: А, Б, В, Г. На карту масштаба 1 : 50 000 приходится 4 листа карты масштаба 1 : 25 000, каждый содержит в своей номенклатуре буквы: а, б, в или г. Карта масштаба 1 : 25 000 дробится, в свою очередь, на 4 листа карты масштаба 1 : 10 000, обозначаемых цифрами 1, 2, 3, 4. На рис. 1.53 приведен пример участка карты масштаба 1 : 50 000 номенклатуры У-34–37-В.

Лист топографической карты содержит ряд обязательных элементов: картографическое изображение, внутреннюю и внешнюю рамки карты и так называемое зарамочное оформление. Лист ограничен с востока и запада меридианами, а с севера и юга – параллелями, формирующими внутреннюю рамку



Рис. 1.52. Разграфка на трапеции ($4 \times 6^\circ$) и номенклатура листов карты миллионного масштаба 1 : 1 000 000 территории Российской Федерации. Схема с сайта <http://skachattrendy.weebly.com/blog/category/all/6>

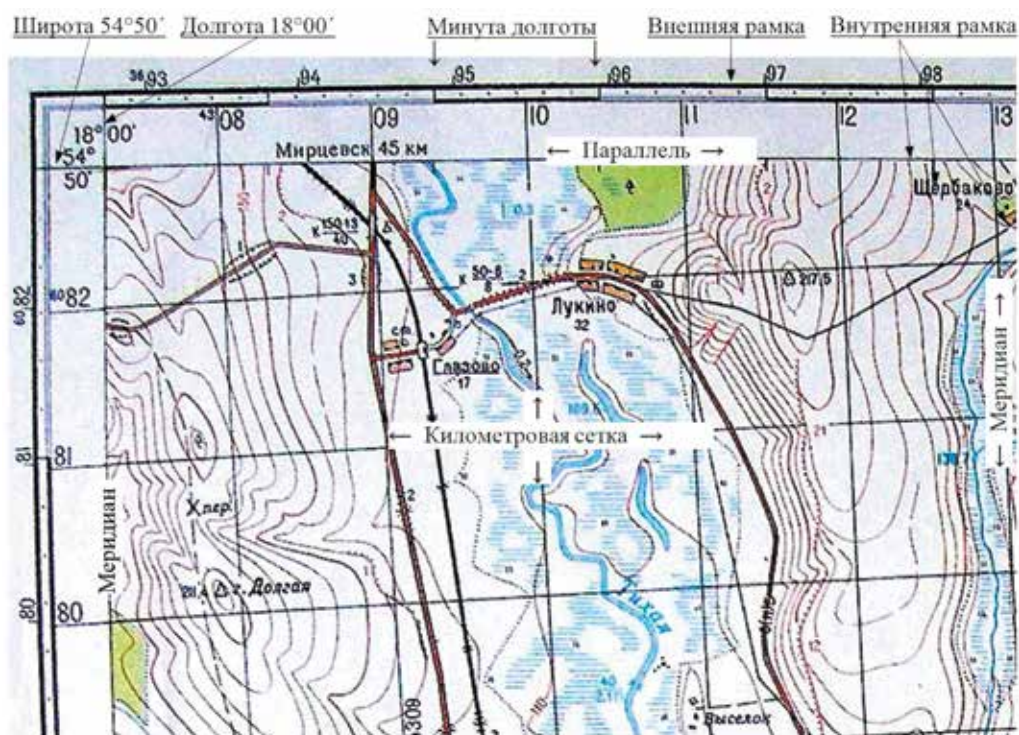


Рис. 1.53. Фрагмент верхнего (северного) левого угла учебной топографической карты У-34-37-В (Снов) масштаба 1 : 50 000

карты. Так как меридианы сближаются к полюсам (см. рис. 1.51), то рамка каждого листа представляет собой трапецию. Количество трапеций зависит от масштаба, а их положение на земном шаре строго определено географическими координатами вершин четырех ее углов, обозначенных с точностью до целых минут.

На приведенном фрагменте карты (рис. 1.53) присутствует прямоугольная координатная сетка через 1 км. Вертикальные линии параллельны осевому меридиану, горизонтальные – экватору. Точное расстояние до них в целых километрах подписывается у границ рамки. В углах рамки расстояния пишутся полностью (первые две цифры обычно мельче). Так, цифра 6082 у горизонтальной линии сетки (левый верхний угол) обозначает координату x и ее удаление от экватора на 6082 км. Чтобы не загромождать картографическое изображение, остальные линии подписаны только двумя последними цифрами. В том же левом верхнем углу карты имеется полная подпись вертикальной линии $y = 4308$ км – расстояние от осевого меридиана (с учетом сдвига, см. выше). Оно равно 308 км, а первая цифра 4 – номер зоны. Указание номера зоны обязательно, если необходимо производить сопоставление координат точек из разных зон.

Для удобства определения широт и долгот объектов на карте внешняя рамка двойная и по внутреннему контуру через одну минуту ($1'$) залита черной краской, а внутри рамки имеется 6 точек через десять секунд ($10''$), что позволяет при известном навыке отсчитывать географические координаты с точностью до 1-й угловой секунды. По краям внешней рамки приводится дополнительная километровая сетка в виде черточек с соответствующими подписями. Эти штрихи предназначены для преобразования координат одной зоны в систему координат другой, соседней, зоны (рис. 1.53). На карте с внешней стороны рамки помещаются различные сведения. Вверху, над рамкой, в центре указывается номенклатура и имеющийся на листе наиболее крупный населенный пункт (в круглых скобках). Ниже номенклатуры приводится год издания карты. Внизу карты, под рамкой, есть данные о магнитном склонении и сближении меридианов, линейный и численный масштабы карты, сведения о высоте сечения рельефа. Правее линейки масштаба находится шкала заложений, предназначенная для определения крутизны склонов рельефа, и указывается, когда создана и обновлена карта. Данные о времени создания (обновления) карты позволяют судить о соответствии карты современному состоянию природной среды территории. Следует отметить, что топографические карты масштаба $1 : 200\,000$ и мельче могут быть найдены в Интернете для всей территории нашей страны и стран ближнего зарубежья. Карты более крупного масштаба следует заказывать в региональных картографических предприятиях.

Чтение карт. Сложность этой процедуры заключается, прежде всего, в том, что на карте характеристики местности и размещенные на ней объекты изображены условными знаками. Кроме того, некоторые характеристики не имеют обозначений на карте, но могут быть установлены по комплексу косвенных признаков, так как все элементы картографического изображения существуют во взаимосвязи [Берлянт, 2002]. Объекты на большинстве карт (реки, населенные пункты, линейные сооружения и др.) изображаются условными знаками, не имеющими масштабного соответствия оригиналу. Условные знаки изображены на картах намного крупнее своего оригинала и в большинстве случаев обобщают свойства объектов. Теория создания и применения условных знаков довольно сложна и продолжает развиваться с появлением новых приемов отображения картографической информации, например электронных карт, в том числе и в 3D формате [Берлянт, 2002].

На фрагменте карты (рис. 1.53) приведена долина р. Тихая в окружении холмистого рельефа. Двойными голубыми линиями изображена большая река, односторонней – ее левый приток (впадает с левого берега). Определить, где какой берег, помогают черные стрелки с цифрами (квадрат 8109), показывающие направление течения и среднюю скорость (в м/с). Встав лицом вниз по течению, определяют, где правый и левый берега. Долина р. Тихая заболочена. Не сплошная голубая штриховка показывает, что это травянистое проходимое болото с глубиной, на-

пример, в квадрате 8209 – 0,3 м. Некоторые характеристики реки можно также узнать из карты. Так, в квадрате 7910 показан знак брода. Дробь при знаке означает, что ширина реки 40 м, средняя глубина 2,1 м. Рельеф показан коричневыми линиями – горизонталями – линиями равных отметок рельефа в Балтийской системе высот. Расстояние по высоте между горизонталями – сечение рельефа – указывается внизу рамки, на данной карте оно равно 10 м. Горизонтالي, кратные 5, обычно показываются утолщенными линиями. Наименьшие высоты рельефа – на заболоченном лугу – около 110 м (квадрат 7909). Наивысшие отметки вершин холмов 211,4 и 217,5 м обозначены специальными условными знаками – треугольниками с точкой (соответственно квадраты 8007 и 8111).

Днища речных долин, примыкающие к склонам холмов, традиционно используются для прокладки авто- и железнодорожных путей, линий электропередач и других так называемых линейных сооружений. Так, на приведенном фрагменте карты имеется двухпутная не электрифицированная железная дорога со станцией «Глазово». В квадрате 8208 она пересекает шоссе под мостом. Его характеристики приведены в групповом знаке:

$$K \frac{150 - 13}{40},$$

в котором символ K обозначает тип материала (камень), числитель – длину и ширину в метрах, знаменатель – допустимую нагрузку в тоннах. Для автодорог также приведены их характеристики, например, в квадрате 7911. Группа знаков 8(11) Б означает, что ширина проезжей части – 8 м, ширина от кювета до кювета – 11 м, дорога мощена булыжником (в случае асфальтового покрытия это будет буква А). Из карты также видно, что и долина реки, и холмы практически лишены леса. Лишь на вершине холма в квадрате 8108 имеются отдельные деревья, и в квадратах 7907 и 8210 есть сильно разреженные лесные массивы без указания типа леса, средней высоты и толщины деревьев и среднего расстояния между ними (указываются в таком случае групповым знаком в виде дроби).

1.2.2. Аэрофотоснимки

Топографические карты содержат достаточно точную информацию о водосборах рек. Однако информация на картах часто требует обновления. Сведения о современном состоянии земной поверхности получают с помощью аэрофотосъемки чаще всего в видимом диапазоне спектра с самолетов. В последние годы получили распространение съемки с беспилотных летательных аппаратов. Широко применяются аэрокосмические съемки в инфракрасном и других диапазонах спектра, в том числе сканирование земной поверхности (радарные или лидарные съемки). Наука, изучающая методы определения количественных (метрических) характеристик объектов по этим снимкам, называется фотogramметрией.

Аэрофотоснимок представляет собой изображение земной поверхности, полученное фотографированием на пленочную или цифровую камеру с какого-либо летательного аппарата. Различают плановые и перспективные снимки. Первые получают при ориентировании плоскости снимка (фотокамеры) параллельно земной поверхности. Площадь охвата таких снимков в целом невелика. Вторые получают наклонной фотокамерой, которая захватывает гораздо большие территории, в том числе и недоступные для полетов. Перспективная съемка также может быть выполнена с земли. В практике наиболее распространены плановые аэрофотоснимки в связи с более простой методикой получения количественных характеристик об элементах земной поверхности. Для этого необходимо располагать так называемой стереопарой – двумя смежными снимками, имеющими перекрытие более 60 %. На стереопаре можно рассматривать объемное изображение местности с помощью прибора стереоскопа. В последнее время объемное изображение местности создают с помощью специального ПО из цифровых фотографий. В свободном обращении в сети Интернет имеется ПО для просмотра и несложных измерений на мониторе обычного ПК, в том числе в автоматическом или полуавтоматическом режиме.

Эффект объема, получивший в компьютерной терминологии обозначение *3D*, возникает в силу того, что расположенные на удалении от наблюдателя предметы при просмотре с разных точек, соответствующих левому и правому глазу, имеют различное угловое смещение – параллакс. При рассмотрении стереопары таким образом, что каждый глаз воспринимает только для него предназначенное изображение (на стереоскопе или экране монитора), создается иллюзия объемной картины. Кроме просмотра изображения на стереопаре могут быть выполнены различные измерения расстояний и высот с помощью стереокомпаратора: специального оптического прибора или компьютерной программы. Основой измерения служит величина параллакса α . Этот прием определения расстояния с давних пор применялся в фотоаппаратах и оптических дальномерах. Расстояние от наблюдателя до объекта L можно вычислить по формуле

$$L = \frac{D}{2 \sin \frac{\alpha}{2}},$$

где D – расстояние между точками съемки стереопары, так называемая база.

Компьютерные фотограмметрические инструменты. Еще сравнительно недавно основу измерений на аэрофотоснимках составляли оптико-механические приборы, которые и сегодня обеспечивают наивысшую точность. Вместе с тем как в нашей стране, так и за рубежом большое развитие получили цифровые стереообработывающие программы и комплексы [Цифровые фотограмметрические системы..., 2004; Назаров, 2006]. Последние пока еще уступают

по точности, но их отличает большее удобство, производительность и технологичность за счет возможностей современного программного обеспечения, основанного на использовании искусственного интеллекта и «компьютерного зрения». Однако стоимость цифрового оборудования и программного обеспечения высока и ее содержание под силу преимущественно специализированным предприятиям. В последние годы, по-видимому, на волне общего интереса к 3D фото- и кинематографии бурно развивается направление так называемой ближней фотограмметрии [Гельман, 2011 а, б]. Здесь нашли применение бытовые цифровые фотокамеры и недорогое или свободно распространяемое ПО. Основными способами получения стереоскопического эффекта по цифровым изображениям являются анаглифический, затворный и оптический. Анаглифический способ не предполагает использование специального компьютерного оборудования и требует наличия лишь анаглифических очков. На стереомодели левое и правое изображения окрашиваются в дополнительные цвета (чаще в сине-зеленый и красный) и выводятся на экран таким образом, что четные строки совмещенного изображения принадлежат левому снимку, а нечетные – правому. Полученное на экране монитора совмещенное изображение рассматривается через анаглифические очки, стекла которых окрашены в те же цвета, что и соответствующие им изображения снимков. В результате каждый глаз воспринимает только одно изображение, и наблюдатель видит стереоскопическую модель местности. Затворный способ предполагает применение специальных жидкокристаллических очков с *LCD*-затворами, в которых стекла становятся прозрачными поочередно, в соответствии со сменой видеостраниц на экране монитора. Поскольку смена снимков на экране монитора синхронизирована с изменением прозрачности стекол очков при помощи специального канала связи, то наблюдатель видит стереоэффект.

При оптическом способе на экран монитора выводятся оба снимка. Оба изображения окрашены в естественные цвета, поэтому для их рассматривания и получения стереоскопического эффекта нужно выполнить искусственное разделение соответственных лучей, что достигается применением специальной стереоприставки, устанавливаемой перед монитором. Это обеспечивает возможность наблюдения объемной модели местности и ее измерения минуя неизбежные потери света при использовании других способов.

Измерение на построенной рассмотренными выше способами стереоскопической модели выполняют, как и в случае использования обычных фотоснимков, монокулярным и стереоскопическим способами. Монокулярный способ применяют для нанесения на снимки опорных точек при внутреннем ориентировании снимков. Применительно к обработке цифрового изображения монокулярные измерения сводятся к опознаванию нужной точки путем наведения на нее маркера, заменяющего измерительную марку стереокомпаратора. Считывают координаты точки в системе растрового изображения

и преобразовывают их в ту или иную систему в автоматическом режиме. Стереоскопические измерения выполняют способом мнимой марки, в качестве которой используют курсор, настраиваемый по цвету, размеру и форме.

Примером применения компьютерных технологий в фотограмметрии может служить цифровой стереокомпаратор «StereoComparator v.4.2», который объединяет в себе функции стереоскопа и параллаксометра. Программа разработана фирмой «Stereo Pixel» и в сочетании со стереоочками может быть использована при решении следующих задач:

- стереоскопический просмотр на экране компьютера стереопары цифровых изображений;
- ручные стереоскопические измерения, фиксирование точек и сохранение их стереокоординат в таблице с целью последующей обработки во внешней программе.

Изображение рабочей панели программы показано на рис. 1.54.

К стереокомпаратору выпускаются дополнительные модули, которые позволяют производить:

- автоматический пересчет стереокоординат точек на стереоизображении в трехмерные координаты соответствующих им точек реального пространства в базисной системе координат стереокомпаратора;

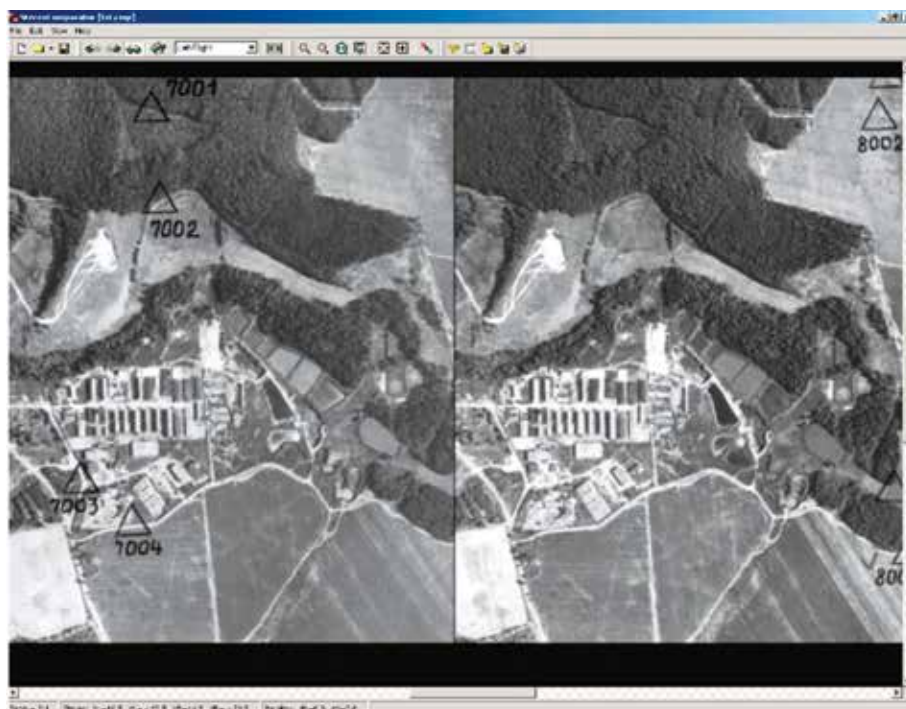


Рис. 1.54. Рабочая панель программы стереокомпаратора «StereoComparator v.4.2» с загруженной тестовой стереопарой. Фото с сайта <http://www.stereo-pixel.ru>

- автоматизированное дешифрирование снимков;
- визуальная проверка в трехмерном пространстве стереоизображения результатов ручного или автоматического дешифрирования снимков, проведенного вне стереокомпаратора;
- автоматическое формирование цифровых трехмерных моделей объектов наблюдения;
- визуальная проверка в трехмерном пространстве стереоизображения внешних цифровых трехмерных моделей объектов.

Аэрофотоснимки позволяют определять различные количественные и качественные свойства объектов по прямым и косвенным дешифровочным признакам. К прямым признакам относят цвет, тон фотоизображения, а также форму, размеры, структуру объектов. К косвенным признакам относят то, что напрямую не связано со свойствами объектов. Так, вертикальные размеры некоторых объектов (деревьев, обрывов и т.п.) могут быть восстановлены по размерам отбрасываемых ими теней. Часть косвенных дешифровочных признаков основана на тесных взаимосвязях природных явлений. Так, по типу растительности можно определить характер увлажнения территории и т.д. Разработаны многочисленные рекомендации по дешифрированию аэрофотоснимков для тех или иных целей, содержащихся в инструкциях, монографиях и статьях, например [Инструкция..., 1974; Назаров, 2006].

1.2.3. Дистанционное зондирование Земли

К этому направлению исследований относят пассивные съемки отраженного от земной поверхности сигнала в различных диапазонах спектра (мультиспектральные данные) и активное сканирование поверхности, например, с помощью лазерных систем с низко- или высоколетящих аппаратов [Назаров, 2006]. Первыми национальными системами природно-ресурсного направления были Ресурс (1970-е годы, СССР), зарубежными – Landsat (1972 г., США) и SPOT (1986 г., Франция). В зависимости от принципа получения информации выделяют снимки фотографические (аналоговые и цифровые), телевизионные и радиолокационные изображения, а также лазерное сканирование земной поверхности и др. Обработка данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) включает коррекцию, улучшение качества снимка, дешифрирование и визуализацию данных обработки. В доступной форме информация об этом широко освещена в сети Интернет, например на сайте <http://mapexpert.com.ua>. На этапе предварительной обработки мультиспектральных данных прежде всего выполняют коррекцию изображений, в том числе геометрическую, радиометрическую калибровку снимков, коррекцию влияния атмосферы, восстановление пропущенных пикселей. Уделяется внимание также улучшению спутниковых снимков, главным образом за счет контрастирования и фильтрации данных. Геометрическая коррекция состоит из устранения геометрических искажений

снимка и его привязка к географической системе координат. Среди причин геометрических искажений – кривизна поверхности Земли. Искажения формы и размера объектов на снимке получаются из-за того, что точки земной поверхности, во-первых, не лежат в одной плоскости, во-вторых, плоскость снимка находятся под углом к поверхности Земли (не в надире). На качество сканерных снимков в отличие от фотоснимков влияет также вращение Земли и движение космического аппарата. В этой связи качество снимка зависит от формы и высоты орбиты спутника. Например, круговая орбита обеспечивает одинаковую высоту съемки земной поверхности, одинаковый охват и разрешение снимков. Радиометрическая калибровка снимков заключается в приведении исходных значений яркости DN, вырабатываемых съемочной аппаратурой в физические единицы. Радиометрическая коррекция влияния атмосферы состоит в устранении эффекта поглощения и рассеивания при прохождении через атмосферу электромагнитных волн (таблица) за счет водяного пара, частиц пыли и других причин.

Одной из серьезнейших проблем при ДЗЗ в видимой области спектра (таблица) является затенение объектов облачностью.

Ультра- фиолето- вый, УФ	Синий, С	Зеле- ный, З	Крас- ный, К	Ближний ин- фракрасный БИК	Средний инфракрас- ный СИК	Тепловой инфракрас- ный ТИФ	
0,1	0,38	0,5	0,6	0,78	1,0	3,5	10
Длина волны, мкм							

Существуют различные способы атмосферной коррекции. Среди них математические методы на основе моделирования прозрачности атмосферы. Для уточнения таких моделей используют наземное измерение отражательной способности объектов во время полета спутника. Так как в красном и ИК участках спектра поверхность воды по своим оптическим характеристикам близка к абсолютно черному телу, прозрачность атмосферы можно оценить по снимкам, включающим участки морей и океанов. Дефекты снимков из-за пропущенных пикселей могут возникнуть по чисто техническим причинам. Их можно восстановить путем интерполяции с определенной погрешностью. Контрастирование – один из приемов улучшения качества снимка. Под контрастом понимают разность между максимальным и минимальным значениями яркости пикселей. Слабый контраст – наиболее распространенный дефект изображений (рис. 1.55).

Существует несколько методов повышения контраста путем цифровой обработки: линейное растягивание, нормализация, выравнивание гистограммы или фильтрация. Всем значениям яркости присваиваются новые значения с целью охватить весь возможный интервал изменения яркости. Так, на рис. 1.56, 1 показан снимок пониженной контрастности за счет серой так

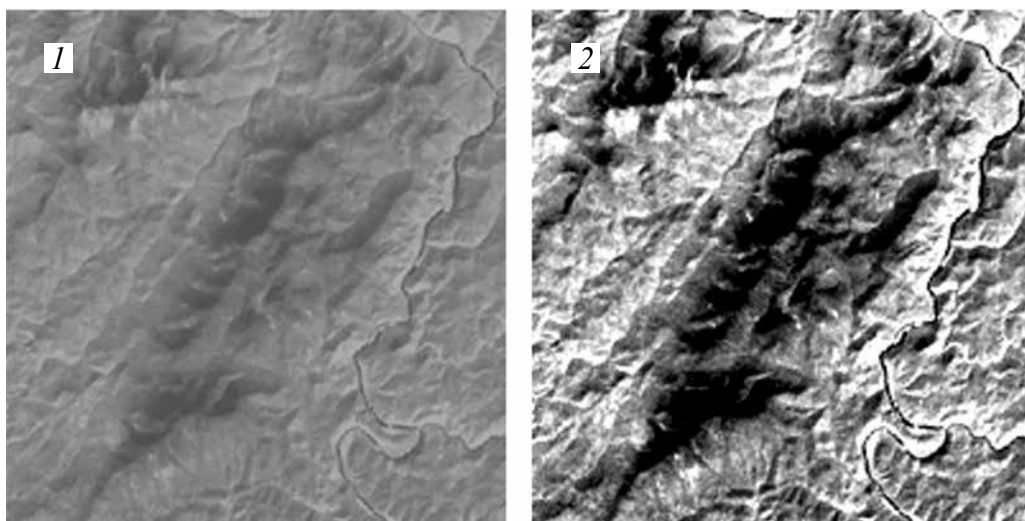
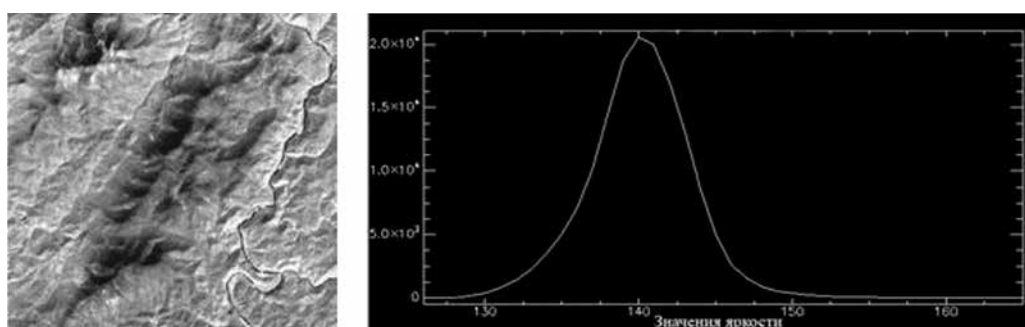
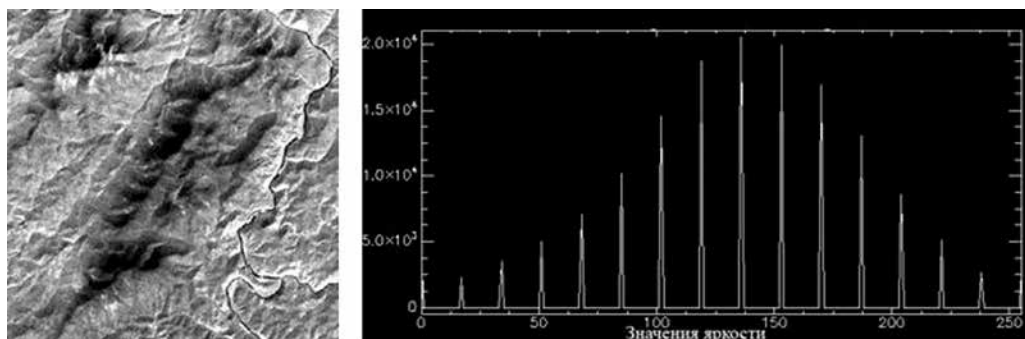


Рис. 1.55. Неконтрастное (1) и контрастное (2) изображение одного и того же участка местности. Фото с сайта <http://mapexpert.com.ua>



1



2

Рис. 1.56. Повышение контрастности снимка за счет линейного растягивания гистограммы: 1 – исходный снимок и его гистограмма, 2 – снимок после линейного растягивания гистограммы. Фото с сайта <http://mapexpert.com.ua>

называемой вуали. Здесь яркости пикселей снимка изменяются от 126 до 155 при среднем ее значении 140. Путем «отрезания» значений яркости вне этого диапазона, которые и формируют вуаль, гистограмма растягивается и становится более плавной. Снимок при этом становится несколько контрастнее и чище за счет того, что яркости охватывают весь возможный диапазон (от 0 до 255) (рис. 1.56, 2).

Тот же снимок может быть улучшен за счет нормализации гистограммы, когда растягивается не вся гистограмма, а ее средняя наиболее информативная часть (рис. 1.57).

В процессе выравнивания гистограммы (рис. 1.58) происходит изменение значений яркости пикселей таким образом, чтобы для каждого уровня яркости было одинаковое или близкое количество пикселей.

Фильтрация позволяет усилить воспроизведение тех или иных объектов, подавить серый тон на снимке (вуаль), устранить случайные помехи (шум). В процессе фильтрации происходит пересчет значений яркости пикселей изображения, при этом каждому пикселу дается новое значение, которое является функцией от величин, окружающих его в окне пикселей. Пересчет осуществляется компьютерной программой методом так называемого скользящего окна. Размер окна может быть разный, чаще всего 3×3 пиксела. Пересчет ведется циклически по строкам матрицы начиная с верхнего левого угла, каждый раз окно смещается на 1 пиксел и движется до тех пор, пока не пройдет весь снимок. Для расчетов весовые коэффициенты назначаются исходя из целей дешифрирования. В качестве примера рассмотрим три комбинации весовых коэффициентов пикселей скользящего окна 3×3 :

а			б			в		
0,1	0,1	0,1	-1	-1	-1	-1	3	-1
0,1	0,1	0,1	-1	3	-1	-1	3	-1
0,1	0,1	0,1	-1	-1	-1	-1	3	-1

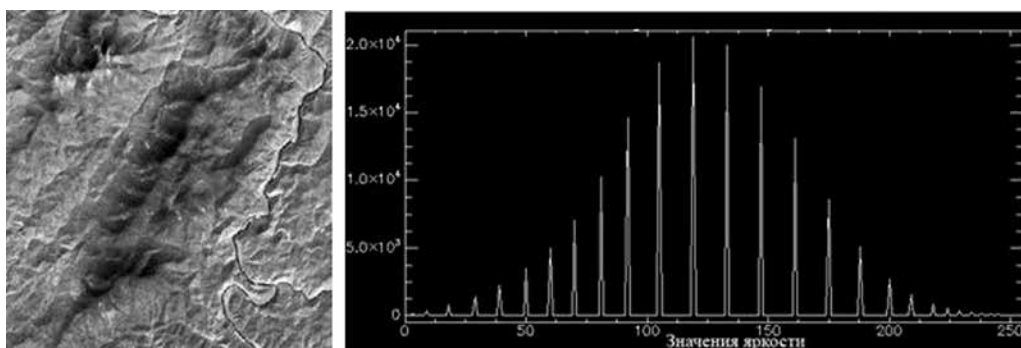


Рис. 1.57. Повышение контрастности снимка за счет растягивания средней части гистограммы (нормализация). Фото с сайта <http://mapexpert.com.ua>

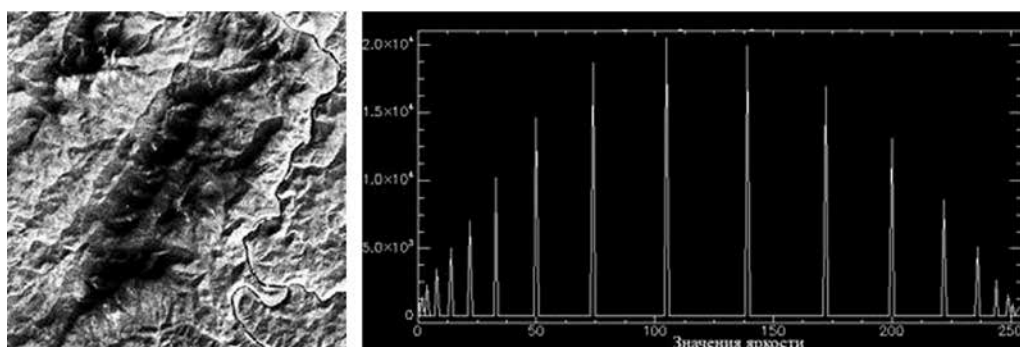


Рис. 1.58. Повышение контрастности снимка за счет выравнивания гистограммы.
Фото с сайта <http://mapexpert.com.ua>

а – весовые коэффициенты всех пикселей равны, б – центральный пиксел имеет существенно большее значение, чем остальные, в – весовые коэффициенты вертикально расположенных пикселей будут существенно выше остальных. Если весовые коэффициенты всех пикселей в окне равны, изображение будет сглажено (рис. 1.59, 1). Превышение весового коэффициента центрального пикселя над остальными приведет к повышению резкости изображения (рис. 1.59, 2). Выделить на снимке линейные объекты меридионального направления можно путем указания повышенных значений весовых коэффициентов вертикально расположенных пикселей (рис. 1.59, 3).

Важное значение при ДЗЗ имеет специальная обработка мультиспектральных снимков, которая позволяет облегчить дешифрирование или распознавание объектов и явлений на снимках. Среди видов обработки различают: цветовые преобразования, индексные изображения, анализ главных компонент, метод спектрального разделения, классификация.

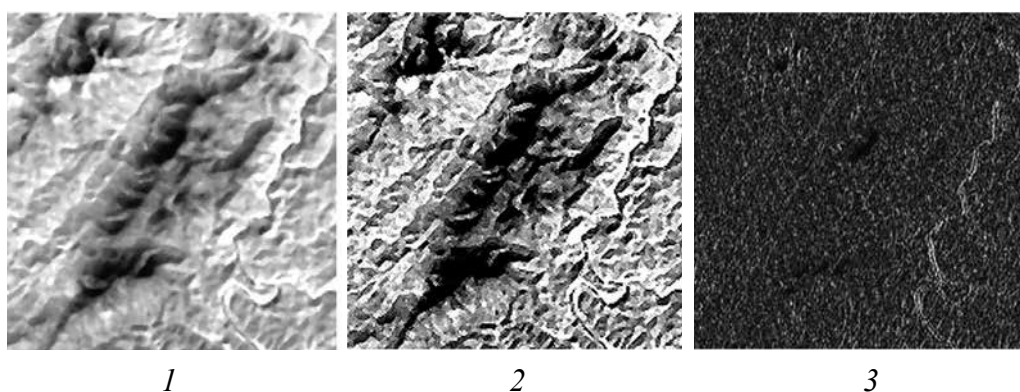


Рис. 1.59. Изменение качества снимка за счет эффекта фильтрации. Обозначения в тексте.
Фото с сайта <http://mapexpert.com.ua>

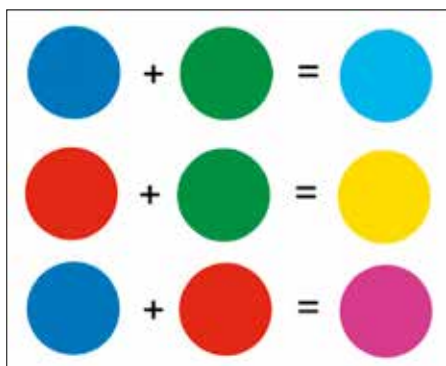
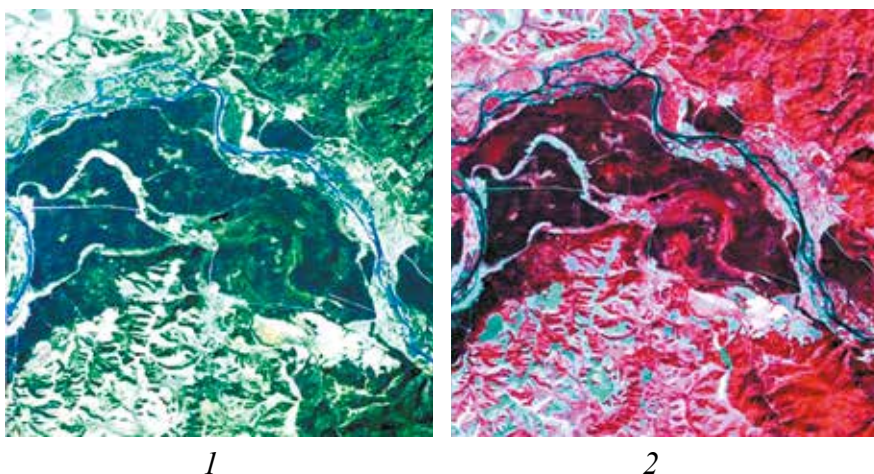


Рис. 1.60. Аддитивная схема формирования цветов пикселей излучающего проекционного оборудования. Фото с сайта <http://mapexpert.com.ua>

Следует отметить, что цветное изображение на изучающем проекционном оборудовании (например, монитор компьютера) получается путем сложения трех основных цветов. За основные приняты цвета, соответствующие излучениям с длиной волны 0,7 мкм (красный – R); 0,5461 мкм (зеленый – G); 0,4358 мкм (синий – B). Такое представление цвета называют аддитивной цветовой моделью RGB. В файле цветного изображения для каждого пикселя записано три числа, которые означают интенсивности трех основных цветов, диапазон значений от 0 до 255. Так, при значениях яркостей цветов пикселя R = 250, G = 0, B = 0 он будет окрашен в красный цвет. Если значение

яркости R, G, B не равны между собой, то в зависимости от значений яркости R, G, B пиксел будет излучать определенный цвет (рис. 1.60).

Изображение любого канала многоспектрального снимка будет окрашено в серые тона. Цветное изображение получается путем сложения всех каналов многоспектрального снимка. Для удобства работы со снимками их часто окрашивают в натуральные (R, G, B каналы) и ложные (R, G, B каналы + другие каналы снимка) цвета. На снимке, окрашенном в натуральные цвета (рис. 1.61, 1), цвет воды в реке будет синим, растительности – зеленым, почвы – коричневым.



1

2

Рис. 1.61. Пример окраски снимка в натуральные (1) и ложные (2) цвета. Фото с сайта <http://mapexpert.com.ua>

На снимке, окрашенном в ложные цвета (рис. 1.61, 2), на котором канал Р дан в ближнем инфракрасном цвете, цвет воды в реке будет практически черным, растительности – красным, почвы – серо-голубым. Сущность объектов целесообразно определять на изображениях в натуральных цветах, а выделять ландшафты удобнее на изображениях в ложных цветах. Правильно подобранная цветовая шкала позволяет визуально выделять объекты, мало различающиеся по яркости на полутоновом (в серых тонах) изображении.

Большое распространение при обработке данных ДЗЗ получило создание так называемых индексных изображений. Для получения индексного изображения значение яркости каждого пиксела вычисляется путем применения арифметических операций над значениями яркости этого пиксела из разных каналов снимка. На таких изображениях более ярко и контрастно выделяются искомые объекты по сравнению с исходным снимком. Некоторые рекомендации по формированию индексных изображений приведены в табл. 1.16.

Получило широкое распространение автоматизированное дешифрирование снимков с выделением требуемых объектов. Оно основано на классификации пикселей изображения по определенным правилам. Существуют мощные методы классификации с обучением и без обучения. Классификация с обучением – это процесс, при котором сравнивается значение яркости каждого пиксела с эталонами, в результате каждый пиксел относят к наиболее подходящему классу объектов. Классификация без обучения осуществляется на основе анализа статистического распределения яркости пикселей.

Карты высот рельефа служат основой для многих видов гидрологических и экологических исследований. Как отмечалось ранее, до недавнего времени единственным источником данных о рельефе местности служили бумажные карты различного масштаба. Распространение ГИС-технологий потребовало создание цифровых карт рельефа, основу которых составляют цифровые модели рельефа (ЦМР). Создано несколько ЦМР, охватывающих значительную часть суши земли, называемых глобальными моделями рельефа [Глобальные цифровые модели..., 2015]. Среди них WordDEM по точности превосходит все остальные модели рельефа, полученные по данным ДЗЗ (табл. 1.17). Из-за своей доступности большой популярностью среди специалистов в области гидрологии и других наук о Земле обладает ЦМР на основе данных SRTM (табл. 1.17)

Радарная топографическая съемка (Shuttle radar topographic mission – SRTM). Съемка выполнялась в 2000 г. с помощью специальной двухточечной сканирующей системы для большей части поверхности суши Земли, за исключением самых северных ($>60^\circ$ с.ш.) и южных широт ($>54^\circ$ ю.ш.).

Существует несколько вариантов обработки материалов съемки, которые во всех случаях представляют собой отметки рельефа в узлах сетки квадратов. Данные с размером сетки, равной одной угловой секунде (SRTM1 – около 30 м),

Таблица 1.16. Формирование индексных изображений по: <http://mapexpert.com.ua>

Название индекса	Формула	Применение	
Индекс содержания оксида железа	Отношение значений яркости в красном (К) канале к значениям яркости в синем канале (С). К/С	Для выявления содержания окислов железа	
Индекс содержания глинистых минералов	Отношение значений яркости в пределах среднего инфракрасного канала (СИК). СИК1/СИК2 СИК1 – от 1,55 до 1,75 мкм, СИК2 – от 2,08 до 2,35мкм	Для выявления содержания глинистых минералов	
Индекс содержания железистых минералов	Отношение значения яркости в среднем инфракрасном (СИК1) канале к значению яркости в ближнем инфракрасном канале (БИК). СИК1/БИК	Для выявления содержания железистых минералов	
Индекс краснотности (RI)	Основан на различии отражательной способности краснотных минералов в красном (К) и зеленом (З) диапазонах. RI = К –З/К + З	Для выявления содержания оксида железа в почве	
Нормализованный дифференциальный вегетационный индекс (NDVI)	Хлорофилл листьев растений отражает излучение в ближнем инфракрасном (БИК) диапазоне электромагнитного спектра и поглощает в красном (К). Отношение значений яркости в этих двух каналах позволяет четко отделять и анализировать растительные от прочих природных объектов. NDVI = (БИК – К)/(БИК + К)	Показывает наличие и состояние растительности. Значение NDVI варьируют от –1 до 1	
		Тип объекта	Значения NDVI
		Густая растительность Разреженная растительность Открытая почва Облака Снег и лед Вода Искусственные материалы (бетон, асфальт)	0,7 0,5 0,025 0 –0,05 –0,25 –0,5
Нормализованный дифференциальный индекс снега (NDSI)	NDSI – это относительная величина, характеризующаяся различием отражательной способности снега в красном (К) и коротковолновом инфракрасном (КИК) диапазонах. NDSI = (К – КИК)/(К + КИК)	Используется для выделения территорий, покрытых снегом. Для снега NDSI > 0,4	
Водный индекс (WI)	WI = 0,90 мкм/0,97 мкм	Применяется для определения содержания воды в растительности по гиперспектральным снимкам	

Таблица 1.17. Основные характеристики глобальных ЦМР
по: [Глобальные цифровые модели..., 2015]

Название, год создания (обновление)	Источник данных	Разработчик	Охват (условия распространения)	Сайт в сети Интернет	Размер сетки (")/(≈ м) абс. точность высот, м
WordDEM, 2014–2015 (продолжается)	Интерферометрические пары радарных снимков спутников TerraSAR-X, TanDEM-X	Airbus Defence and Space	Вся земная поверхность (на коммерческой основе)	www.geo-airbusds.com/worldDEM	$0,4 \times 0,4$ (12×12) 4
NextMap World 10, 2015	SRTM, ASTER GDEM2, данные лазерного сканирования ICESat	Intermap (США)	То же	www.intermap.com/data/nextmap-world-10	$0,4 \times 0,4$ (12×12) от 10
NextMap World 30	То же	Intermap (США)	То же	www.intermap.com/data/nextmap-world-30	1×1 (30×30) от 10
ALOS AW3D	Радарные снимки со спутника ALOS-2 и архивные оптические данные со спутника ALOS	NTT DATA, RESTEC (Япония)	То же	//alos-world3d.jp/en/	$0,2 \times 0,2$ (5×5) от 5 по заказу $0,1 \times 0,1$ ($2,5 \times 2,5$)
SRTM C-band, 2003	Интерферометрические пары радарных снимков, полученные в 2000 г. с Shuttle	NASA, NGA (США)	80 % земной поверхности (в свободном доступе)	www2.jpl.nasa.gov/srtm/	1×1 (30×30) для США, 3×3 (90×90) для остальных территорий ≤ 16
SRTM X-band, 2011	То же	DRL (Германия)	То же	www.drl.de/eoc/tabid-5515/9214_read-17716	1×1 (30×30) ≤ 16
ASTER GDEM, 2011	Стереопары сенсора Aster спутника Terra	МЕТИ (Япония), NASA (США)	99 % земной поверхности (в свободном доступе, есть некоторые ограничения использования)	//asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp	1×1 (30×30) 12–30

доступны на территорию США и Евросоюза, на остальную поверхность земли доступны только трехсекундные данные (SRTM3 – около 90 м). При использовании этих данных следует учитывать тот факт, что радиолокационная аппаратура измеряла высоту отражающих поверхностей, а не поверхность рельефа, создав цифровую модель местности (ЦММ). Так, в районах с лесным покровом на ЦММ даны отметки некой осредненной поверхности, проходящей по верхушкам деревьев, на застроенных территориях – высота достаточно неопределенна, так как зависит от большого числа факторов, таких как густота застройки, этажность зданий и т.п. Поэтому получить из данных SRTM цифровую модель рельефа можно путем оценки точности на открытых незастроенных территориях, не покрытых кустарниковой и древесной растительностью, и при условии, что толщина снежного покрова на этих участках в период съемки достаточно мала, чтобы ею можно было пренебречь [Оньков, 2011].

Следует также отметить, что размер сетки выражен в угловых единицах $3 \times 3''$ дуги широты и долготы на эллипсоиде WGS-84. Так как для расчета длин и площадей в метрической системе необходимо преобразование сетки к соответствующей картографической проекции, ее размер меняется в зависимости от широты места. Так, в системе прямоугольных координат г. Пермь ячейка сетки размером $3 \times 3''$ дуги составляет примерно 93×49 м по оси X и Y [Оньков, 2011].

Данные съемки SRTM свободно распространяются в виде набора архивных файлов, например N40W118.hgt.zip, с различных сайтов в сети Интернет (например, <http://dds.cr.usgs.gov/srtm>). Каждый файл содержит данные, покрывающие территорию в один угловой градус в географической системе координат. Имя файла – это координаты его левого нижнего угла. Так, имя файла N40W118 означает, что матрица отметок рельефа имеет координату левого нижнего угла 40° с.ш. и 118° з.д. Файлы содержат матрицы из 1201 столбца и 1201 строки (соответственно 3601 и 3601 для односекундной версии) значений отметок высот рельефа через 1 м. Один дополнительный столбец на правой боковой стороне и дополнительная строка на нижней стороне матрицы дублируют соответствующие элементы соседних матриц справа и снизу и служат для удобства объединения («сшивания») матриц. Результаты съемки постоянно совершенствуются. В настоящее время распространяются данные SRTM v.3 и SRTM v.4.1 в виде файлов ARC GRID, а также ARC ASCII и в формате Geotiff квадратами $5 \times 5^\circ$ в системе координат (датум) WGS84. Эти данные получены из исходных высотных данных USGS/NASA путем более тщательной обработки, которая обеспечила получение гладких топографических поверхностей, а также интерполяцию областей, в которых отсутствовали исходные данные. Файлы находятся в свободном доступе (табл. 1.17).

Точность оценки высот рельефа по данным SRTM часто бывает весьма важной. В руководстве к проекту SRTM по результатам первичной обработки

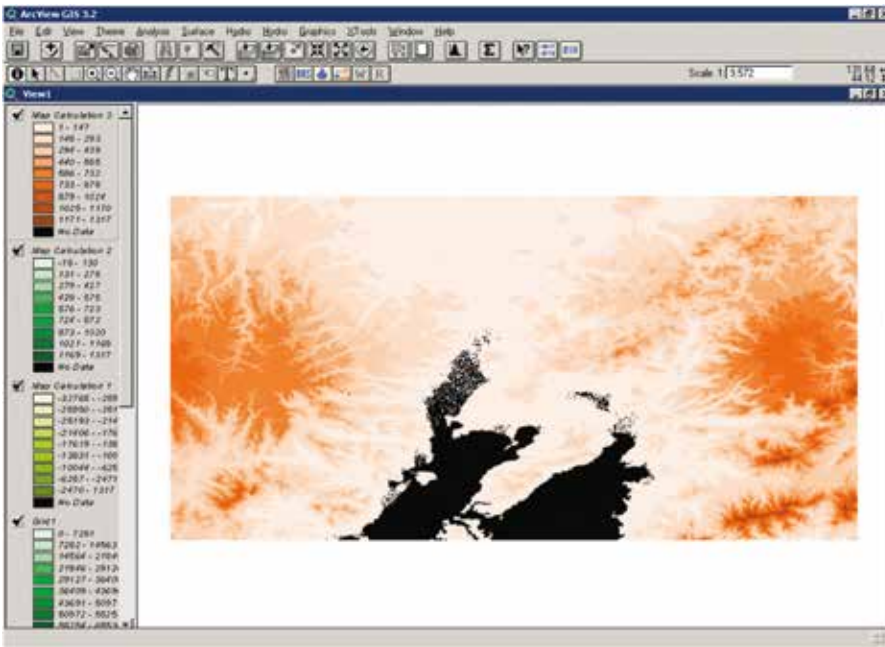


Рис. 1.62. ГИС ArcView 3.2a с отметками рельефа в растровой форме в условных цветах

данных съемки (версия 1) была заявлена средняя абсолютная вертикальная ошибка высот рельефа около 16 м. Последующая обработка данных позволила снизить эту ошибку до 6,2 м [Rodrigues et al., 2006]. Отметки рельефа могут быть импортированы в ГИС и использованы для построения цифровой модели рельефа, которая позволяет выполнять различные определения гидрографических характеристик. На рис. 1.62 приведена рабочая панель программы ArcView 3.2a, на которой показан результат конвертирования файла SRTM в растровый формат данной ГИС.

На рис. 1.63 приведена речная сеть различных порядков с выделенным бассейном р. Малиновка

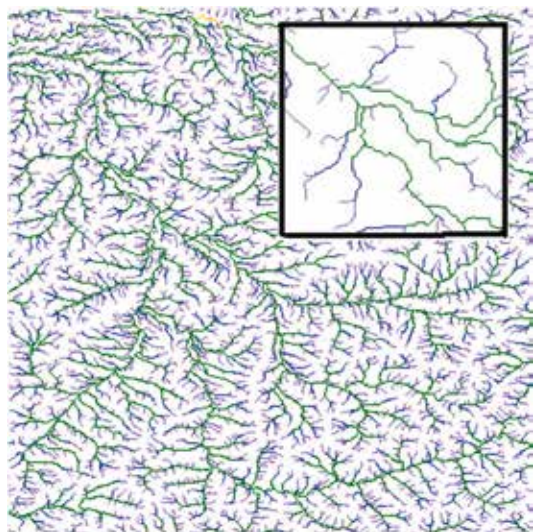


Рис. 1.63. Речная сеть южного Приморья различных порядков с выделенным бассейном р. Малиновка, рассчитанная по модели рельефа на основе SRTM (по данным Ю.В. Крелевецкой)

(Приморский край), восстановленная автоматически с помощью средств ГИС по материалам съемки SRTM.

Таким образом, аэрофотоснимки, космические фотографии и другие материалы дистанционного зондирования земной поверхности существенно расширяют инструментарий гидрологических и экологических исследований. Их сочетание с полевыми изысканиями позволяют получить более качественные и современные материалы и, что особенно существенно, более обоснованно распространять результаты точечных полевых исследований на неизученные территории.

1.2.4. Государственный водный кадастр

В 1931 г. Госпланом СССР было принято решение о разработке и публикации материалов под названием «Водный кадастр СССР», в котором по единой методике были обобщены сведения о режиме морей, рек, озер, болот, ледников и подземных вод. Первый водный кадастр был подготовлен Государственным гидрологическим институтом (ГГИ) по материалам гидрологических наблюдений с 1875 по 1935 г. под руководством Гидрометеорологического комитета СССР в 1933–1940 гг. Бурное развитие страны в середине прошлого века потребовало расширения наблюдательной сети. Была организована система наблюдательных станций: метеорологические, гидрологические, аэрологические, морские, агрометеорологические, стоковые, устьевые, болотные, озерные и микросейсмические. В период с 1960 по 1979 г. Гидрометеорологической службой СССР была выполнена разработка и издание нового водного кадастра, публикуемого под общим названием «Ресурсы поверхностных вод СССР». Новый водный кадастр включал три серии изданий:

- Гидрологическая изученность;
- Основные гидрологические характеристики;
- Ресурсы поверхностных вод СССР.

К 1978 г. была подготовлена новая редакция водного кадастра – «Государственный водный кадастр СССР» (ГВК). Ведение кадастра осуществлялось по единой системе, включающей данные учета вод по количественным и качественным показателям, регистрации пользователей, а также данные учета использования вод. Ведение кадастра было поручено Государственному комитету СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды, Министерству геологии СССР и Министерству мелиорации и водного хозяйства СССР.

Публикуемая часть ГВК состоит из трех разделов:

- Поверхностные воды;
- Подземные воды;
- Использование вод.

Каждый из этих разделов подразделяется на следующие серии:

- Каталогные данные (по разделу «Поверхностные воды» на первом этапе каталогом служит ранее изданный справочник «Ресурсы поверхностных вод СССР» ч. 1; «Гидрологическая изученность» и издаваемый ежегодно «Справочник гидрометфонда СССР» ч. 3, гидрология суши);

- Ежегодные данные;

- Многолетние данные (издаются один раз в пять лет).

Серия второго раздела «Поверхностные воды» включает четыре издания: «Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши», «Ежегодные данные о качестве поверхностных вод суши», «Ежегодные данные о селевых потоках», «Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек».

В 1994 г. в целях обеспечения преемственности и непрерывности наблюдений за режимом водных объектов и оценки водных ресурсов Российской Федерации было принято решение о продолжении ведения по единой системе Государственного водного кадастра Российской Федерации. В соответствии с постановлением Правительства РФ от 23 ноября 1996 года № 1403 ведение Государственного водного кадастра Российской Федерации осуществлялось Министерством природных ресурсов Российской Федерации и Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

С 2006 г. эта работа выполняется Федеральным агентством водных ресурсов с участием Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и Федерального агентства по недропользованию. В связи с необходимостью систематизации сведений о водных объектах, находящихся в федеральной собственности, собственности субъектов Российской Федерации, муниципальных образований, физических и юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, а также дальнейшим развитием системы государственных информационных ресурсов, данные ГВК с 2007 г. вошли в состав систематизированного свода документальных сведений о водных объектах Российской Федерации под названием «Государственный водный реестр».

Ежегодные данные. Как составная часть водного кадастра с 1936 г. начали публиковаться ежегодные данные о режиме рек, озер и водохранилищ под названием «Гидрологический ежегодник». В публикуемых материалах содержатся сведения об уровнях и расходах воды, расходах взвешенных наносов, гранулометрическом составе взвешенных наносов и донных отложений и другие данные. В соответствии с «Наставлениями» измерения уровня и температуры воды на гидрологических постах выполняются ежедневно в сроки 08 и 20 ч местного времени наблюдателями с помощью стандартного оборудования. Расходы воды и речных наносов измеряются по мере изменения уровня воды (но не менее 15–20 раз в год). В последнее время есть тенденция внедрения на сети автоматизированных гидрометрических комплексов.

Первые ежегодники выпускали нерегулярно и часто содержали наблюдения сразу за несколько лет. С 1936 г. их выпуски стали более регулярными. Ежегодники всех выпусков, а также другая справочная гидрометеорологическая литература могут быть обнаружены в крупных библиотеках, в библиотеках и архивах научно-исследовательских и проектно-изыскательских организаций. В региональных библиотеках (в том числе в библиотеках вузов) чаще всего имеются ежегодники для тех территорий, в пределах которых они расположены. Закончилась публикация и распространение этих сборников в конце 1980-х. После этого ежегодники готовились, но не поступали в библиотеки, материалы по ним могут быть заказаны в специализированных учреждениях региональных управлений Росгидромета. Материалы ежегодников содержат, кроме данных наблюдений, описание постов, особенности измерений тех или иных характеристик в различные периоды текущего года, сведения о полноте учета стока, исправления и дополнения к предыдущим изданиям, что важно для практической работы.

С 1978 г. ежегодные данные начинают публиковаться под названием «Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» (ЕДС) в разделе 1. Поверхностные воды, серии 2. Ежегодные данные Государственного водного кадастра. Новый ежегодник состоит из двух частей. Часть 1. «Реки и каналы» содержит данные стандартных гидрологических наблюдений на реках за уровнем и температурой воды, стоком воды и наносов, толщиной льда, состоянием водного объекта. В части 2 «Озера и водохранилища» публикуются данные стандартных гидрологических наблюдений на озерах и водохранилищах (на береговых постах и акватории водоемов) за уровнем и температурой воды, толщиной льда, теплозапасом. Как отмечается в предисловии этого издания, формы некоторых таблиц изменены с учетом требований их получения на ЭВМ. С целью сокращения объема издания измеренные расходы воды и наносов, заносимые на технические носители, исключены из ежегодника и хранятся в гидрометфонде. Данные о химическом составе вод публикуются в других изданиях ГВК. В состав ежегодника помещены экстремальные значения уровней и расходов воды за период наблюдений. Начиная с 1981 г. публикация ежедневных данных ГВК осуществляется по единому территориальному делению, основанному на административно-бассейновом принципе. Нумерация томов осуществляется в порядке перечисления союзных республик в Конституции СССР. Всего имеется 15 томов. Том I носит название РСФСР. Внутри томов материалы komponуются на выпуски по бассейновому принципу.

Многолетние данные. Как отмечено выше, с 1978 г. 1 раз в 5 лет начинает издаваться серия справочников Государственного водного кадастра под названием «Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» (МДС), которые продолжают издание справочника «Основные гидрологические характеристики» (ОГХ). Последний вышедший том ОГХ охватывал

период 1971–1975 гг. Справочник также делится на 15 томов по административно-бассейновому принципу. Внутри томов, обобщающих материалы больших территорий (республик), используется бассейновый принцип деления изданий на выпуски. Тома разделены на части как в «Ежегодных данных...». В справочнике приводятся обобщенные сведения о гидрологических характеристиках за весь период наблюдения и погодичные данные за 5 лет: 1976–1980. За весь период наблюдений публикуются погодичные данные по уровням воды, минимальному стоку, половодью, паводкам, для закрытых постов – при продолжительности не менее 10 лет. Некоторые таблицы справочника снабжены сведениями об исходных данных, принятых методах подсчета и другими пояснениями. При подготовке таблиц выполнен анализ однородности имеющихся рядов наблюдений. Случаи нарушения однородности, например при переносе постов, указаны в пояснениях к таблицам. При отсутствии наблюдаемого явления соответствующие графы таблицы не заполняются, в некоторых таблицах в этом случае пишется «нб» (не было), что оговаривается в пояснениях к таблицам. При отсутствии сведений или невозможности определения какой-либо величины из-за значительных пропусков в наблюдениях или низкой их точности в графе ставится тире, а приближенные ее значения заключаются в скобки.

Исходными данными для составления таблиц МДС служат материалы наблюдений сети Государственного комитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды, проектно-изыскательных, научно-исследовательских институтов и других организаций. При подготовке издания за 1976–1980 гг. была произведена проверка, анализ и взаимная увязка материалов наблюдений, что позволило в ряде случаев уточнить ранее опубликованные данные, а также оценить публикуемые материалы. Исправления к предыдущим изданиям серии ОГХ помещены после всех таблиц, исправления к опубликованным ежегодникам – в ЕДС за 1983 г. [Государственный водный кадастр..., 1986].

Ресурсы поверхностных вод СССР. В период с 1960 по 1979 г. Гидрометеорологической службой СССР была выполнена разработка и издание нового водного кадастра, публикуемого под общим названием «Ресурсы поверхностных вод СССР», включавшего три серии изданий:

- Гидрологическая изученность;
- Основные гидрологические характеристики;
- Ресурсы поверхностных вод СССР.

Серия «Гидрологическая изученность» содержит сведения о количестве и размерах рек и озер Советского Союза, данные об их стационарной и экспедиционной изученности, а также перечень литературных и неопубликованных источников и работ, в которых имеются сведения о водных объектах района.

Серия «Основные гидрологические характеристики» (ОГХ) содержит проверенные материалы наблюдений по режиму рек, озер и водохранилищ на станциях Гидрометеорологической службы и других ведомств за периоды:

от начала их действия до 1962 год включительно, с 1963 по 1970 г. и с 1971 по 1975 г. в виде сводных таблиц с пояснительным текстом к ним. Издание продолжено с 1978 г. серией «Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» (см. выше).

Серия «Ресурсы поверхностных вод СССР» представляет собой монографию, разработанную коллективами сотрудников территориальных Управлений Гидрометеорологической службы СССР в содружестве с ГГИ. Каждая из серий водного кадастра состоит из 20 томов, часть которых в свою очередь включает несколько выпусков. Деление на тома и выпуски произведено по принадлежности территории к крупным речным бассейнам с учетом, по возможности, и административных границ (табл. 1.18).

Материалы наблюдений воднобалансовых станций. В начале 1960-х годов были развернуты масштабные исследования речного стока и водного баланса небольших водосборов на сети воднобалансовых станций (ВБС). Среди них Бомнакская, Подмосковная, Приморская, Нижнедевицкая, Каменная Степь и др. Обширные исследования проводились и продолжают проводиться Валдайским филиалом ГГИ. Экспериментальные наблюдения на ВБС выполнялись по комплексной программе, в которой среди стандартных гидрометеорологических наблюдений велись исследования поверхностного и почвенного стоков на склонах водосборов, водного и теплового режима почв, испарения, перехвата осадков растительностью и мн. др. Результаты наблюдений публиковались в ежегодных справочниках под названием «Материалы наблюдений воднобалансовой станции». В 1990-х годах наблюдения на многих из них были свернуты, на действующих станциях произошло сокращение программ наблюдений.

Приморская воднобалансовая станция (ПВБС). Станция создавалась по инициативе ГГИ для проведения специальных исследований условий формирования паводочного стока и определяющих его факторов в районе с преимущественно дождевым питанием [Материалы наблюдений..., 1967]. На основании исследований, выполненных Приморским УГМС в 1946 г., был выбран бассейн р. Супутинка (ныне – р. Комаровка). Физико-географические условия водосбора реки, оказывающие влияние на формирование стока, типичны для южной части Дальнего Востока вне зоны многолетнемерзлых пород. В бассейне р. Комаровка присутствуют водосборы как равнинные, так и горные, открытые и полностью облесенные.

В материалах ПВБС 1-го выпуска обобщены данные с 1940 по 1960 г. по следующим наблюдениям: над стоком рек и ручьев в десяти пунктах, стоком со стоковых площадок в шести пунктах, стоком взвешенных наносов в одном пункте, химическим составом воды в одном пункте, метеорологические в двух пунктах, над осадками в 30 пунктах, снегомерные на пяти водосборах и шести стоковых площадках, над испарением с поверхности суши в одном

Таблица 1.18. Схема деления серий издания «Ресурсы поверхностных вод СССР» на тома и выпуски

Том	Вы- пуск	Название территории	Том	Вы- пуск	Название территории
1		Кольский полуостров	14		Средняя Азия
2		Карелия и Северо-Запад		1	Бассейн р. Сыр-Дарья
3		Северный край		2	Бассейны оз. Иссык-Куль и рек Чу, Талас, Тарим
4		Прибалтийский район		3	Бассейн р. Аму-Дарья
	1	Эстония		4	Туркмения
	2	Латвия	15		Алтай и Западная Сибирь
	3	Литовская ССР и Калинин-градская область		1	Горный Алтай и Верхний Иртыш
5		Белоруссия и Верхнее Приднепровье		2	Средняя Обь
6		Украина и Молдавия		3	Нижний Иртыш и Нижняя Обь
	1	Западная Украина и Молдавия	16		Ангаро-Енисейский район
	2	Среднее и Нижнее Приднепровье		1	Енисей
	3	Бассейн Северного Донца и реки Приазовья		2	Ангара
	4	Крым		3	Бассейн оз. Байкал (Забайкалье)
7		Донской район	17		Ленско-Индиго-Гирский район
8		Северный Кавказ		1	Верхняя Лена
9		Закавказье и Дагестан		2	Средняя Лена
	1	Западное Закавказье		3	Бассейн р. Алдан
	2	Бассейн р. Аракса		4	Бассейн р. Лена от устья р. Алдан до устья р. Вилюй и бассейн р. Вилюй
	3	Дагестан		5	Нижняя Лена (бассейн р. Лена ниже устья р. Вилюй)
	4	Восточное Закавказье		6	Реки Хатанга, Анабар и Оленек
10		Верхне-Волжский район		7	Реки Яна, Индигирка
11		Средний Урал и Приуралье	18		Дальний Восток
	1	Кама		1	Верхний и Средний Амур
	2	Тобол		2	Нижний Амур
12		Нижнее Приволжье и Западный Казахстан		3	Приморье
	1	Нижнее Приволжье		4	Сахалин и Курилы
	2	Урало-Эмбинский район	19		Северо-Восток
13		Центральный и Южный Казахстан	20		Камчатка
	1	Карагандинская область			
	2	Бассейн оз. Балхаш			

пункте, испарением с водной поверхности в двух пунктах, влажностью почвы на четырех участках, промерзанием и оттаиванием почвы в 20 пунктах, уровнем грунтовых вод в восьми пунктах, осадками под пологом леса по 20 осадкомерам, температурой воды в реках и скважинах грунтовых вод, а также над толщиной льда на реках. Второй выпуск материалов наблюдений ПВБС охватывает период с 1961 по 1965 г. С 1966 г. выпуски включают только один год наблюдений, за исключением 6-го выпуска, содержащего материалы наблюдений за 1969 и 1970 гг. Публикация материалов Приморской ВБС заканчивается 23-м выпуском (1987 г.).

Связанные с гидрологией метеорологические характеристики. Сведения по метеорологическим характеристикам (температуре и влажности воздуха, атмосферным осадкам и др.), имеющим существенное значение для гидрологических прогнозов, расчетов и моделирования стока, приводятся в «Метеорологических ежемесячниках», в которых публикуются данные по сети постоянных метеостанций и постов за стандартные сроки и среднесуточные значения за календарный месяц. Измерения выполняются в сроки 00, 06, 12, 18 ч местного времени наблюдателями с помощью стандартных метеорологических приборов. Ежемесячники публикуются по выпускам для конкретных регионов России, а также частям, в которых сгруппированы различные сведения.

Сведения о климате, обобщающие данные метеорологических ежемесячников за период с начала наблюдений по 1964–1969 гг. (в зависимости от выпуска), опубликованы в издании «Справочник по климату СССР». Справочник состоит из 34 выпусков, составленных управлениями Гидрометеорологической службы СССР по единой программе и методике, разработанной в Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова (ГГО) и утвержденной редколлегией ГУГМС при Совете Министров СССР под председательством чл.- корр. АН СССР М.И. Будыко. Каждый выпуск состоит из пяти частей, которые содержат характеристики отдельных элементов климата: часть I – Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние; часть II – Температура воздуха и почвы; часть III – Ветер; часть IV – Влажность воздуха, атмосферные осадки и снежный покров; часть V – Облачность и атмосферные явления. Издана также серия справочников «Метеорологические данные за отдельные годы», разделяющихся по выпускам аналогично изданию «Справочник по климату СССР».

В конце 1980-х годов была подготовлена новая серия пособий под названием «Научно-прикладной справочник по климату СССР», состоящая из 35 выпусков. Номер выпуска справочника, как и «Справочника по климату СССР», указывает на принадлежность данных к территории определенного управления по гидрометеорологии [Научно-прикладной справочник..., 1988]. Справочник состоит из шести частей. В них содержатся следующие климатические характеристики: солнечная радиация и солнечное сияние (часть 1), температура

воздуха и почвы (часть 2), ветер и атмосферное давление (часть 3), влажность воздуха, осадки и снежный покров (часть 4), облачность, атмосферные явления, гололедно-изморозевые образования (часть 5), комплексы метеорологических величин (часть 6).

Государственный водный реестр. Постановлением Правительства РФ от 28 апреля 2007 г. № 253 в соответствии с Водным кодексом РФ был введен в действие Государственный водный реестр (далее – ГВР), представляющий систематизированный свод документированных сведений о водных объектах, находящихся в федеральной собственности, собственности субъектов Российской Федерации, муниципальных образований, физических и юридических лиц и индивидуальных предпринимателей. В ГВР были внесены и данные ГВК по состоянию на 1 января 2007 г. Общая структура реестра приведена в табл. 1.19.

Сведения, полученные в установленном порядке Федеральным агентством водных ресурсов в результате наблюдений в рамках государственного

**Таблица 1.19. Структура Государственного водного реестра
(в редакции 18 апреля 2014 г.)**

Наименование раздела	Раздел содержит сведения о:
Водные объекты и водные ресурсы	а) бассейновых округах; б) речных бассейнах; в) водных объектах, расположенных в границах речных бассейнов, в том числе об особенностях режима водных объектов, их физико-географических, морфометрических и других особенностях.
Водопользование	а) водохозяйственных участках; б) водоохранных зонах и прибрежных защитных полосах, зонах затопления, подтопления, а также других зонах с особыми условиями их использования; в) использовании водных объектов, в том числе о водопотреблении и сбросе вод, в том числе сточных, в водные объекты; г) договорах водопользования, в том числе об их государственной регистрации, переходе прав и обязанностей по договорам водопользования, а также о прекращении указанных договоров; д) решениях о предоставлении водных объектов в пользование, в том числе об их государственной регистрации, а также о прекращении права пользования водными объектами, предоставленными на основании этих решений; е) иных документах, на основании которых возникает право собственности на водные объекты или право пользования водными объектами; ж) разрешениях на захоронение грунта, извлеченного при проведении дноуглубительных работ, во внутренних морских водах и в территориальном море Российской Федерации.
Инфраструктура на водных объектах	а) водохозяйственных системах; б) гидротехнических и иных сооружениях, расположенных на водных объектах.

мониторинга водных объектов, включаются в реестр в 30-дневный срок с даты их поступления в соответствии с правилами внесения в него сведений, утверждаемыми Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Реестр ведется на бумажных и электронных носителях. При несоответствии записей на бумажных носителях записям на электронных носителях приоритет имеют записи на бумажных носителях.

1.3. ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведение комплексных исследований рек, озер и других водоемов требует привлечение специалистов различных наук. Практически всегда они связаны с необходимостью получения первичных материалов (данных наблюдений) в натурных условиях, что требует существенных материальных затрат и необходимость привлечения исполнителей с навыками проведения исследований в натурных (полевых) условиях. Координация таких исследований требует исключительных усилий как на этапе разработки программ и выполнения подготовительных мероприятий, так и на этапе проведения полевых изысканий, включая камеральные работы, обобщение полученного в поле, опубликованных и архивных материалов.

Будет уместно отметить, что наряду с термином «исследования» применительно к полевым работам можно встретить также термин «изыскания», которые во многом сходны. И в том, и в другом случае целью служит получение сведений о природных объектах. Но есть и различия. Обычно «изыскания» называют «инженерными» и связывают с требованиями проектных и производственных организаций на дополнительную информацию о водных объектах для проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений. Состав сооружений очень широк: от комплексных гидроузлов с плотинами, водохранилищами, гидроэлектростанциями и водозаборами для водоснабжения до систем орошения и осушения и линейных сооружений типа автомобильных и железных дорог, линий электропередач, нефте- и газопроводов и мн. др. Изыскания по большей части проводят с помощью стандартных методов и приборов. Состав изысканий и перечень измеряемых характеристик обычно невелик и строго регламентирован заданием. Работы чаще всего выполняются специализированными организациями (в настоящее время различных форм собственности, включая небольшие группы и отдельных лиц), имеющими государственные лицензии на проведение соответствующих работ, например ТИСИЗами – трестами инженерно-строительных изысканий. В работах принимает участие узкий круг инженеров: топографов, гидрологов и геологов (гидрогеологов), гораздо реже привлекаются специалисты других направлений. В «исследованиях», кроме стандартных приборов и методов, включают новые инновационные методы и оборудование, а спектр оцениваемых параметров

природной среды во многих случаях более широк. Здесь есть простор для научного поиска и проявления индивидуальных подходов в науке. В этой связи термин «исследования» часто предваряется словом «научные». Такие работы иницируются теми же проектными, производственными и иными организациями для получения дополнительных сведений о природных объектах и обычно выполняются академическими и ведомственными НИИ и исследовательскими центрами с привлечением различных, а порой и уникальных специалистов. Во многих случаях, особенно для работ, выполняемых для целей проектирования и строительства, институтами и центрами получают государственные лицензии на право производства соответствующих работ. Исследования включают не только оценку состояния естественной природной среды, урбанизированных объектов на основании расширенного списка характеристик, но и изучение условий формирования тех или иных природных явлений. Это бывает необходимо для составления проектов природопользования территорий, оценки и учета возникающих изменений природных условий в связи с нарушением первоначально сложившихся естественных взаимосвязей из-за изъятия природных ресурсов или строительства сооружений. Часто исследования выполняются для целей прогнозирования во времени изменения отдельных природных объектов, природной среды в целом, а также отдельных искусственных природных объектов, например водохранилищ, и инженерных сооружений (плотин ГЭС, каналов и т.п.).

Виды и этапы работ. Комплексные гидрологические исследования принято выполнять в определенной последовательности. Различают три этапа: 1) подготовительные работы; 2) полевые работы; 3) окончательные камеральные, в том числе и лабораторные, работы и подготовка отчета [Васильев, Шмидт, 1978]. Хотя этот перечень известен давно, содержание некоторых этапов в настоящее время претерпело существенные изменения в связи с появлением новых форм собственности на землю, передовых методов получения информации, ГИС и т.п.

Подготовительные работы. Подготовительные работы включают в себя значительный перечень организационных и предварительных камеральных работ. Вопросам организации исследований часто уделяется недостаточно внимания, но именно на этом этапе закладываются основы будущих результатов всего мероприятия. Литературы, посвященной общим вопросам планирования и организации науки, много и перечислять ее не входит в нашу задачу. Стоит лишь сослаться на классический труд П.Л. Капицы [1977], в котором отводится много места планированию в физических науках. Обозначим основные принципы и направления подготовительного этапа.

Научно-исследовательские проекты всегда имеют определенный объем финансирования. Часто от этого зависит состав и продолжительность полевых работ. В научных исследованиях еще нередко на эти процессы влияет возмож-

ность привлечения тех или иных специалистов и специального оборудования. С тем чтобы эффективно распорядиться имеющимися финансовыми и другими ресурсами, следует тщательно планировать будущую деятельность, в том числе объем полевых работ и лабораторных исследований. Этому во многом помогает составление программы и календарного плана полевых работ и детальной сметы расходов. И, конечно, никакие научные исследования не обойдутся без разработки плана мероприятий по охране труда и технике безопасности при производстве полевых и лабораторных работ. Предварительные камеральные работы включают сбор, систематизацию, изучение и анализ уже имеющихся материалов по объекту исследований. Сюда относятся литературные и архивные материалы, топографические карты, аэрофотоснимки, отчеты экспедиций прошлых лет. Чем полнее подобраны и лучше изучены материалы по району исследований, тем большая возможность представляется сократить объем полевых работ, тем полноценнее будут общие результаты исследований.

Полевые работы. Под полевыми работами (в отличие от камеральных и лабораторных работ) специалисты в области естественных наук понимают получение количественных и качественных характеристик о природных объектах непосредственно на месте их существования (*in situ*). Такие работы выполняются организованными группами, которые, в зависимости от численности, именуются полевыми отрядами (в геологической практике – партиями) или экспедициями.

1.3.1. Топографо-геодезические работы

Работы на реках требуют выполнения как простых линейных измерений, так и более сложных, связанных с закреплением на местности положения измерительных профилей и некоторых приборов, подробного картирования рельефа и микрорельефа участков рек с «привязкой» к государственной системе координат и высот. Геодезическими методами делают привязку водомерных свай, реек, других точек к постоянным или временным реперам, плановое и высотное обоснование топографических съемок, посредством которых создаются планы и карты исследуемых участков. Все эти работы в конечном счете сводятся к измерению расстояний между точками и высотных отметок элементов рельефа.

Исследователь не всегда располагает специальными геодезическими инструментами и навыками их применения (рис. 1.64).

Для того чтобы выполнить измерения на местности, не требующие высокой точности, применение такого оборудования просто нецелесообразно. Человеческий опыт располагает многочисленными приемами выполнения простейших измерений либо подручными средствами, либо изготовленными самостоятельно, либо с помощью несложных и недорогих приборов [Ганьшин, 1973].



Рис. 1.64. Современные геодезические приборы: 1 – тахеометр; 2 – нивелир; 3 – ГЛОНАС/GPS приемник. Фото с сайта <http://www.geodezist.info>

На картах и планах принято оперировать с чертежами участков Земли на горизонтальной плоскости. Установить зависимость между точками на земной поверхности и на плоскости позволяют, как отмечалось ранее, картографические проекции. При этом физическая поверхность Земли отображается на математически правильную модель поверхности, которая, в свою очередь, отображается на плоскости. В нашей стране в качестве модели поверхности Земли используется референц-эллипсоид Красовского с параметрами (рис. 1.65): большая полуось – 6 378 245 м, малая полуось – 6 356 863 м [Берлянт, 2002].

Небольшой участок уровенной поверхности Земли можно принять за плоскость. Такую плоскость называют *горизонтальной*. Линия, образующая с ней угол 90° , называется *вертикальной*, или *отвесной*, линией. Направление отвесной линии совпадает с нитью спокойно висящего груза (отвеса) и очень часто используется при измерениях на местности. Над воображаемой уровенной поверхностью территории суши располагается рельеф местности, каждая точка которого может быть перенесена или спроектирована на нее отвесными линиями. На рис. 1.66 точки рельефа *A* и *B* на горизонтальной плоскости представляются своими проекциями *a* и *b*, а линия *AB* отобразится так называемым *горизонтальным положением* *ab*.

Относительное положение точек на местности, таким образом, определяется их положением на горизонтальной плоскости и высотой над некоторой



Рис. 1.65. Параметры эллиптической модели Земли

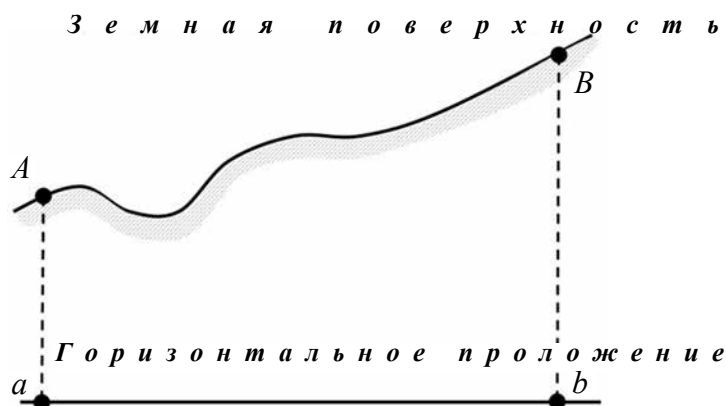


Рис. 1.66. Проекция точек земной поверхности на горизонтальную плоскость

уровенной поверхностью. Высоты точек измеряются в метрах и называются абсолютными, если они измеряются от уровня моря (записывается: м абс.), и условными – если от иной горизонтальной поверхности (записывается: м усл.). В нашей стране принята государственная абсолютная система отметок, отсчитываемая от «0» Балтийского футштока. Условные отметки, например, для плана произвольного участка реки отсчитываются от некоторой высоты, характерной для данной местности, часто 100 м.

Составление планов, измерение глубин по профилям более или менее больших участков русел рек удобно «привязывать» к некоторой линии с известными координатами, проходящей по всему участку. Чаще всего линия прямая, но если участок реки меняет направление, то уместно создать несколько прямых отрезков, пересекающихся под известными углами. Расстояния на местности измеряют с помощью бытовых или специальных геодезических рулеток (рис. 1.67). В условиях непересеченной местности при измерении длин линий удобно использовать измерительные колеса (дорожные курвиметры), длина окружности которых есть мера длины. Встроенный счетчик определяет количество оборотов колеса и рассчитывает длину пройденного расстояния в метрах (рис. 1.68). В последнее время получили распространение ручные лазерные дальномеры (лазерные рулетки), в которых расстояние определяется с помощью лазерного луча, отраженного от препятствия. Лазерные рулетки имеют возможность измерять расстояния до 200 м с точностью до 1 мм, вычисляют точные значения уклонов, оснащены встроенным калькулятором для вычисления периметров, площадей и объемов, обладают памятью измерений (рис. 1.69).

При составлении плана нужно знать длину горизонтального проложения, которая короче, чем длина наклонной линии. Разность между линиями зависит от угла наклона измеряемой линии к горизонту. Угол наклона измеряется специальными приборами – *эклиметрами*. Зная угол наклона и длину линии,

находят оправку за наклон. Лазерные рулетки (рис. 1.69) выполняют эту операцию автоматически.

Ориентирование линий относительно сторон горизонта с давних пор осуществляется с помощью простого прибора, называемого компасом. Его монополюсное положение в решении этой задачи было потеснено только в последнее время с появлением спутниковых приемов позиционирования точек на местности (технологии GPS, ГЛОНАС). С помощью компаса определяют горизонтальный угол, называемый магнитным азимутом (A_M), между направлением на Север, обозначенный синим концом магнитной стрелки, и направлением измеряемой линии. Отметим, что, повернувшись лицом к Северу, справа будет Восток, слева – Запад, а позади – Юг. Ориентирование линии на карте заключается в задании ее направления относительно сторон горизонта. За начальное направление на топографической карте (плане) принимается северное направление вертикальной линии километровой сетки, параллельное осевому меридиану 6-градусной зоны по принятой в нашей стране системе координат Гаусса–Крюгера. Линию ориентируют с помощью транспортира, откладывают так называемый дирекционный угол (α) в пределах от 0 до 360° от северного направления километровой сетки по ходу часовой стрелки. Чтобы рассчитать этот угол по измеренному магнитному азимуту A_M , существуют формулы перехода вначале к истинному географическому меридиану A , учитывающие так называемое *магнитное склонение* δ , а затем к километровой сетке карты с учетом *сближения меридианов*, сведения о которых приводятся под южной рамкой топографической карты (табл. 1.20).



Рис. 1.67. Геодезическая рулетка



Рис. 1.68. Измерительное колесо



Рис. 1.69. Ручной лазерный дальномер (лазерная рулетка)

Таблица 1.20. Этапы вычислений углов для ориентирования линий на местности и карте

Этап	От местности к карте	От карты к местности	Магнитное склонение, δ	Сближение меридианов, γ
1	$A = A_M + \delta$	$A = a + \gamma$	Положительное	Положительное
	$A = A_M - \delta$	$A = a - \gamma$	Отрицательное	Отрицательное
2	$a = A - \gamma$	$A_M = A - \delta$	Положительное	Положительное
	$a = A + \gamma$	$A_M = A + \delta$	Отрицательное	Отрицательное

Существует также возможность обратного перехода от дирекционно-го угла (a), измеренного на карте, к магнитному азимуту (A_M) на местности (табл. 1.20). При составлении планов крупных масштабов ограничиваются углами, измеренными от истинного (географического) меридиана.

В полевой практике часто бывает необходимо измерить ширину глубокого участка реки, когда обычные приемы (вброд, с лодки или с моста) неприменимы. Встречаются и другие случаи, когда непосредственно величину некоторого расстояния измерить нельзя. Существуют различные решения, которые основаны на принципах тригонометрии. Один, на наш взгляд, из наиболее удобных приемов, предполагающий наличие только мерной ленты и калькулятора, следующий (рис. 1.70).

На противоположном берегу реки у воды выбирается ориентир (дерево у воды, камень и т.п.) и намечается створ AB . Под прямым углом к створу на берегу на расстоянии l от воды (рис. 1.70) прокладывается базисная линия до точки C такой длины, чтобы из нее была видна точка B под углом $30\text{--}60^\circ$.

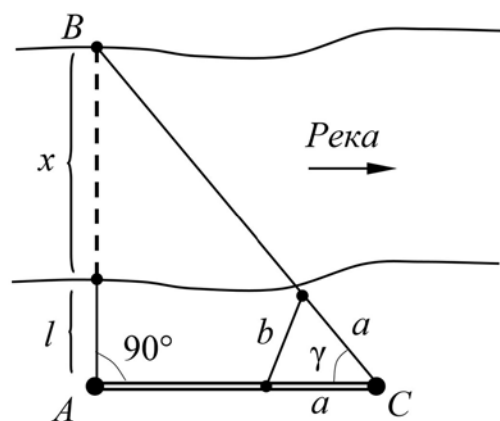


Рис. 1.70. Определение ширины реки тригонометрическим методом (обозначения в тексте)

Угол γ при точке C определяется путем построения двух равных отрезков a и измерения длины основания треугольника b по формуле $b = 2a \cdot \sin(\gamma/2)$ методом подбора углов. Эту формулу можно преобразовать для расчета непосредственно угла $\gamma = 2 \cdot \arcsin(b/2a)$ в градусах. Длину линии створа через реку определяют по формуле $AB = AC \cdot \operatorname{tg}(\gamma)$, из которой вычисляют ширину реки $x = AB - l$. Ганьшин [1973] для повышения точности рекомендует сделать повторное определение x путем построения второго треугольника, например, в обратную сторону от точки A .

Определение высот точек над некоторой уровенной поверхностью называется *нивелированием*, которое выполняется с помощью геодезического нивелира (рис. 1.64). Имеют значение и приближенные оценки высоты объектов подручными средствами [Ганьшин, 1973].

Часто требуется выполнить съемку рельефа небольших участков местности. Сначала на участке создают так называемое планово-высотное обоснование (геодезическую сеть), затем приступают к съемке подробностей (ситуации), производя все измерения от точек и линий этой сети. Во время измерений составляют схематические зарисовки участка реки или другой местности с указанием измеренных величин, таблицы отметок рельефа и/или промеров глубин по профилям. Большую помощь на камеральном этапе создания плана участка дает фото- и видеодокументирование. Так, на рис. 1.71 показан процесс измерений глубин на одном из участков р. Кедровая. Точки промерных вертикалей привязывались к локальной системе координат геодезическими методами. Опорный створ обозначен размеченным через 2 м белым тросом. Перпендикулярно к опорному створу назначались промерные створы, закрепляемые на местности красным шнуром с метровой разметкой и белыми марками. Измерение глубин производилось водомерной рейкой с сантиметровыми делениями в точках промерного створа.

За изменением уровня воды в течение промерных работ ведутся наблюдения по водомерной свае, относительная отметка которой известна. Это позволяет по измеренным глубинам вычислить отметки дна русла.

Таким образом, каждое измерение отметки дна произведено в точке с известными координатами и их несложно нанести на план.



Рис. 1.71. Выполнение промеров глубин на участке р. Кедровая (заповедник «Кедровая Падь», Приморский край). Белая линия обозначает опорный створ, красная – промерный створ. Фото А. Федоровского

При составлении очень подробного плана участка со сложным микрорельефом требуются более частые измерения. Для этой цели хорошо использовать решетку с разметкой 10 на 10 см (рис. 1.72). Решетка углом «привязывается» к основному промерному створу, поэтому координаты точек на решетке могут быть легко установлены. Измерения выполняются рейкой с миллиметровыми делениями в точках, отмеченных разметкой на решетке (рис. 1.72, правый снимок).

Располагая соответствующими пояснениями, зарисовками и фотографиями участка (абрисом) и таблицами промеров, несложно построить план участка вручную или с помощью ГИС. Однако полезно начерно построить план уже в поле с тем, чтобы определить недостатки при проведении работ и какие-то измерения провести дополнительно. Рельеф обычно изображается плавными кривыми линиями равных отметок – *горизонталями*. Их проводят через равные промежутки по высоте начиная с самых низких отметок. Например, для изображения микрорельефа речного дна горизонтали проводят через 2 см. Для получения плана местности с невысокой точностью при проведении предварительных изысканий или для нанесения на детальный план речного русла окружающей обстановки выполняется глазомерная съемка. При этом план местности вычерчивается непосредственно в поле на планшете, расстояния определяются шагами, для нанесения точек применяют компас и трехгранную линейку (рис. 1.73).

Во многих гидрологических работах не обойтись без геодезических приборов. Инструменты для геодезических работ, показанные на рис. 1.64, и некоторые другие различаются по назначению (оценка горизонтальных и вертикальных углов, расстояний, превышений и др.), по классам точности, степени автоматизации измерений и стоимости. Для гидрологических исследований,



Рис. 1.72. Пространственная координация измерений микрорельефа дна с помощью решетки (снимок слева) и ее крупный план, на котором видна разметка (правый снимок).

Фото А. Федоровского

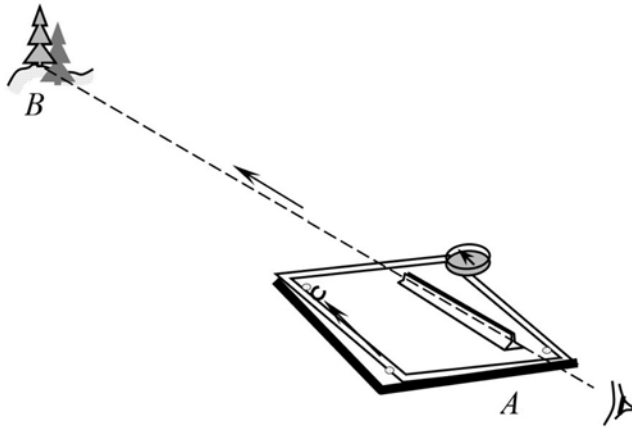


Рис. 1.73. Построение на планшете глазомерной съемки направления AB

как правило, применяют недорогие инструменты так называемого технического класса, используемые в строительстве. В своем большинстве это оптические аналоговые приборы, отсчеты значений в которых осуществляются по шкалам. Однако и в этом классе приборов уже применяются современные лазерные технологии для определения расстояний или передачи отметок, существенно повышающие как точность, так и производительность работ. Выполнение съемок с определенной стандартами точностью с помощью геодезического оборудования требует серьезной профессиональной подготовки. Тем не менее при известной настойчивости и соблюдении указаний инструкций к приборам несложно определить с приемлемой точностью относительные отметки точек нивелиром на участке речного русла или угол поворота опорной магистрали с помощью тахеометра или теодолита. Пространственные координаты и высоты точек могут быть определены бытовыми GPS- и ГЛОНАС-навигаторами. Очень хорошо бытовые навигаторы себя зарекомендовали при работах на больших реках, озерах и т.п.

1.3.2. Гидрометрические работы

Функционирование водных экосистем тесно связано с физическими характеристиками и водным режимом рек. Для их описания должны быть приняты гидрологические изыскания, включающие съемку участка реки, измерение уровней и расходов воды, ее температуры и химического состава, количественную оценку состава донных отложений, которые относятся к гидрометрическим работам. Характеристика водного режима может потребовать также поиск материалов длительных наблюдений за уровнями и расходами воды данной реки или реки-аналога. В процессе гидрометрических работ определяются следующие характеристики [Быков, Васильев, 1965; Лучшева, 1972; Руководство по гидрологической практике..., 2011, 2012].

Уровни воды (H). Измеряются обычно в сантиметрах (см) над плоскостью сравнения, называемой в речной гидрометрии «нуль графика». Различают *средние суточные* уровни воды, определяемые на водомерных постах по двухсрочным наблюдениям (в 8 и 20 ч местного времени), на основе которых рассчитываются *средние декадные, месячные и средние годовые* значения. Экстремальные уровни: максимальные и минимальные, соответственно суточные, месячные и годовые. Они могут быть средними за сутки или *срочными*, т.е. полученными в 8 или 20 ч (посты на реках с изменчивым уровнем режимом оборудуются самописцами уровня воды, тогда экстремальные значения определяются по самописцу).

Выделяют так называемые *характерные уровни* воды. Это уровни высоких вод (УВВ), включающие максимумы, наблюдаемые на посту 1 раз в год, и исторические наблюденные максимумы; уровни низких вод (УНВ), а также уровни выхода воды на пойму, начала ледостава, весенней подвижки льда и ледохода и др. Большое практическое применение имеют так называемые *расчетные уровни* воды заданной *повторяемости* (или вероятности превышения), например 1 раз в 10, 50 или 100 лет. При этом уровни повторяемостью 1 раз в 50 лет относят к средним, менее 50 лет – к минимальным (меженным), более 50 лет – к максимальным уровням. Уровенный режим имеет исключительно большое значение для функционирования водных и прибрежных экосистем. Непрерывные наблюдения за уровнями воды на водомерном посту в конечном счете служат основой для подсчета стока реки за сутки с использованием так называемой *кривой расходов* – зависимости расхода воды от уровня: $Q = f(H)$.

Расходы воды (Q). Измеряются обычно в виде секундного объема (в м³/с), проходящего через поперечный створ реки, небольшие расходы измеряются в л/с. Различают *измеренные расходы* воды, которые служат для построения зависимости $Q = f(H)$ и вычисленные по среднему уровню воды за сутки. В итоге рассчитывается средний годовой расход воды, позволяющий оценить объем стока воды за год W (в м³), модуль стока M (в л/с·км²) и другие характеристики. По годовым расходам вычисляется средний расход воды за многолетний период (обычно 50–60 лет), который лежит в основе оценки *расчетных расходов и уровней воды* заданной повторяемости.

Скорости течения (V). Измеряются в м/с различными способами в 10–12 точках поперечного сечения реки (створа) – скоростных вертикалях и на разной глубине. Скорость течения входит в уравнение расчета расхода воды по методу скорость–площадь. Ее величина играет главную роль в переносе взвешенных (мелкий песок, ил и другие взвеси) и влекомых (крупный песок, галька, валуны и т.п.) наносов, ведет к размыву русла или, наоборот, к отложению наносов. Эти процессы непосредственно воздействуют на жизнедеятельность водных организмов и растительности.

Продольные уклоны свободной поверхности, русла и поймы (I). Оцениваются в промилле (‰) или долях единицы по разнице высот уровней воды в двух створах реки, удаленных на некоторое расстояние. Одно промилле означает падение высоты водной поверхности на 1 м вдоль реки на расстоянии 1 км. В условиях установившегося движения воды (нет паводка) продольные уклоны свободной поверхности и русла совпадают. Уклоны поверхности пойм на одном и том же участке реки, как правило, ниже и более изменчивы, однако на практике принимаются равными уклону русла. Уклоны водной поверхности служат для оценки скорости течения воды (если их не удалось измерить инструментально) по формуле Шези: $V = C \cdot \sqrt{R \cdot I}$, где C – коэффициент Шези, учитывающий сопротивление течению, R – гидравлический радиус: отношение площади поперечного сечения створа F к длине линии дна на поперечном профиле (смоченный периметр χ). На неглубоких реках R обычно заменяется средней глубиной $H_{\text{ср}}$ (см. также раздел 1.1.3).

Наносы, шероховатость русла. Речные наносы (см. также раздел 1.1.5) представляют собой продукты разрушения горных пород различного размера – от мельчайших частиц ила до больших фрагментов скальных горных пород. Перемещаются водой во взвешенном или влекомом (путем перекачивания по дну русла) состоянии. Оцениваются в виде их содержания в некотором объеме воды (в г/л или кг/м³) и в виде расхода наносов через продольное сечение русла реки (в кг/с). Подсчет стока наносов ведется аналогично речному стоку по суткам, декадам, месяцам и т.д.

Русловой процесс. Под русловым процессом понимают изменение формы русла из-за его размыва водным потоком или отложения наносов (см. также раздел 1.1.4). Главную роль в формировании стока наносов и всего руслового процесса играет склоновая и русловая эрозия. Неустойчивые русла, меняющие свое положение во время паводков, характерны для рек, протекающих по легко размываемым отложениям (пески, легкие суглинки, торфяные отложения). Речные наносы, русловой процесс и эрозия служат критическим фактором в формировании речных экосистем. Размыв участков рек ведет к уничтожению закрепленных на дне водных организмов и растительности, повышенная мутность воды препятствует развитию рыб, а отложения наносов уничтожают нерестилища.

Характеристики зимнего режима. Обусловлены снижением температуры воздуха ниже нуля и образованием ледовых явлений. На реках и пойменных озерах формируется ледовый покров, препятствующий притоку света и в особенности кислорода. Зимний режим служит критическим фактором развития водных экосистем.

Химический и биогенный сток. В речной воде существует большое количество растворенных минеральных и органических веществ, а также микроорганизмов. Весь этот комплекс определяет качество вод, их пригодность для

питьевого водоснабжения, организации рыбоводства и состояние водных экосистем в целом. Качество вод характеризуется многими факторами, в том числе концентрацией веществ (организмов) в воде, т.е. их весовым, молекулярным или количественным содержанием в некотором ее объеме (в мг/л, г-моль/л, шт./л и др.), или качественными признаками (цвет, запах, вкус и т.п.). Подсчитывается расход и объемы химического и биогенного стока через поперечное сечение реки аналогично стоку наносов.

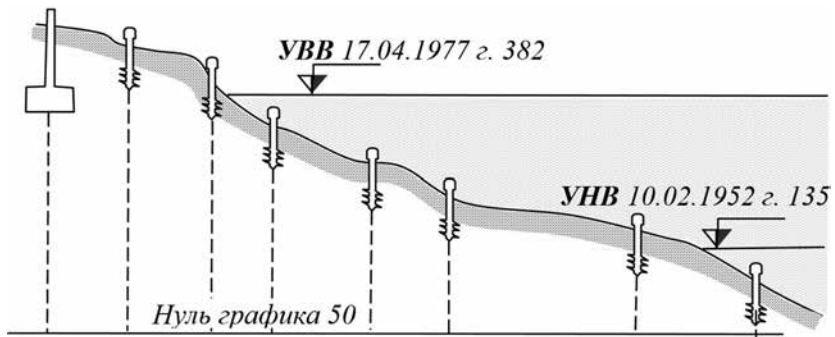
Измерение уровней воды, уклонов и глубин потоков. Уровнем воды (УВ) называется высота поверхности воды над некоторой постоянной плоскостью сравнения – нулем графика поста. Наблюдения за УВ производят на водомерных постах (ВП): *постоянных* (преимущественно Росгидромета) и *временных* – различных ведомств и организаций, ведущих изыскания на реках. Различают водомерные посты по способу устройства: простые, на которых высота уровня измеряется вручную (реечные, свайные и др.), и автоматические – с дистанционным изменением УВ и его регистрацией самописцем [Наставление..., 1975; Руководство по гидрологической практике..., 2011, 2012].

Реечные ВП с вертикальной (реже наклонной) рейкой (деревянной или металлической) состоят из одной или нескольких реек, укрепленных на специально забитых сваях, опорах мостов (рис. 1.74) и иных гидротехнических сооружениях в местах, где имеются условия, обеспечивающие неизменность положения рейки и ее доступность для произведения наблюдений.

Свайные водомерные посты устанавливаются на участках рек с пологими склонами и значительной амплитудой колебания уровня. Состоят из нескольких свай, установленных в одном створе, перпендикулярном направлению русла (рис. 1.75). Посты Росгидромета обычно комплектуются специальными винтовыми металлическими сваями, которые вкручиваются в грунт на глубину не менее 1,5 м (рис. 1.76). Сваи временных постов изготавливаются из подручного материала: отрезков толстостенных труб, стальных стержней или из крепких пород дерева – все зависит от длительности эксплуатации поста.



Рис. 1.74. Водомерные рейки. Фото с сайта <http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=557>; http://spox.ru/ru/termins/1374/vodomerniy_p.html



Номера свай	Rp 1	1	2	3	4	5	6	7
Расстояние от постоянного начала, м	0,00	3,92	7,83	10,7	15,4	19,1	27,9	33,1
Приводка, м	-	4,72	4,26	3,52	2,79	2,35	1,83	1,10
Отметки головок свай, м абс.	55,000	54,712	54,263	53,523	52,794	52,354	51,833	51,102

Рис. 1.75. Профиль свайного водомерного поста

Измерение уровня воды сводится к получению отсчетов по постоянной рейке или свае в сроки 8 и 20 ч местного времени. При измерениях по свае используется переносная водомерная рейка, которая ставится на головку затопленной сваи. Затем к этим отсчетам прибавляется так называемая *приводка* (высота нуля рейки или головки сваи над нулем графика, рис. 1.75), и получают срочные уровни воды, среднее арифметическое которых характеризует средний суточный уровень воды над нулем графика.

Проверка высот нулей постоянных реек и головок свай на водомерном посту осуществляется по основному и контрольному реперам, причем последний ставится в створе поста (рис. 1.75).

Продольный уклон водной поверхности рассчитывают по формуле $I = (H_{\text{в}} - H_{\text{н}})/L$, где $H_{\text{в}}$ и $H_{\text{н}}$ – уровни воды, измеренные соответственно на верхнем и нижнем створе постоянных или временных уклонных водомерных постов, а L – расстояние между ними. Уклон выражается десятичной дробью или в промилле (‰), т.е. в м/км. Уклоны водной поверхности также бывают поперечными, например при повороте русла. Водная поверхность, как отмечалось ранее, имеет очень сложную топографию в местах подпора, стеснения, может иметь разрывы на водопадах и быстротоках.

Несмотря на простоту техники измерения уклона водной поверхности, необходимо соблюдать ряд правил [Лучшева, 1972]. Главные из них следующие. Длина участка L должна быть достаточной для обеспечения точности уклона

на уровне 5–10 %, определяется главным образом типом реки и разностью отметок в створах: не менее 20 см на равнинных и 40 см на горных реках. Отсчеты уровня воды должны быть сделаны с точностью не ниже $\pm 0,5$ см одновременно по сваям на верхнем и нижнем створах.

Глубиной называют расстояние по вертикали от дна до поверхности воды. С помощью *промеров глубин* оценивают площадь поперечного сечения (*живого сечения*) реки в расчетах расходов воды, при построении продольных профилей русла, планов участков рек и т.п. На неглубоких реках промеры глубин осуществляют водомерными рейками в точках, называемых промерными вертикалями. При больших глубинах и небольших скоростях течения воды промеры осуществляют с лодки. До глубины 2 м – деревянным размеченным шестом (наметкой) или трехметровой гидрометрической штангой, при больших глубинах – ручными и механическими лотами. Распространено измерение глубин с различных переправ через реки: мостов, гидрометрических мостиков и люточных переправ ручными и механическими лотами [Наставление..., 1975; Руководство по гидрологической практике..., 2011, 2012].

Назначение промерных вертикалей ведется так, чтобы отразить все перегибы дна продольного профиля реки. Положение вертикалей закрепляются марками на разметочном тросе, разметкой на мосту начиная от постоянного на-

чала (рис. 1.77). На больших реках измерение глубин ведется с судна, оборудованного механической лебедкой. Положение поперечного профиля и промерных вертикалей осуществляется засечками и/или GPS- и ГЛОНАС-навигаторами. Здесь часто применяются приборы бесконтактного измерения глубин – эхолоты или профилографы, ведущие непрерывную запись глубин. При измерениях глубин лотом следует учитывать относ. груза течением и прогиб троса. Фактическая глубина при этом оказывается меньше той, что показывается на счетчике лебедки, в особенности на реках с большими скоростями течения.

Во время производства промеров на каждом поперечном профиле фиксируется высота уровня



Рис. 1.76. Водомерный пост Росгидромета с винтовыми сваями

воды на водомерном посту (постоянном или временном) в начале и конце промеров. Если высота уровня воды во время промеров изменилась, то глубины приводят к одному так называемому мгновенному уровню, за который часто принимается уровень воды в конце работ.

Измерение скоростей течения и расхода воды. Скорость течения представляет собой путь, пройденный частицами воды за единицу времени, и обычно измеряется в гидрометрии в метрах в секунду (м/с). Измерение скорости течения – следующий этап в последовательности действий по оценке расхода воды, взвешенных и влекомых наносов способом «скорость–площадь» после промеров глубин. Часто скорости и направление течений измеряют при изучении распространения загрязнений и русловых деформаций. Распределение скоростей по глубине носит закономерный характер. В открытом свободном от препятствий прямолинейном русле наибольшая скорость наблюдается в приповерхностном слое воды (рис. 1.78, 1).

С глубиной скорость снижается до минимального значения в придонном слое воды. График изменения скорости с глубиной, называемый эпюрой, может иметь различные очертания в зависимости от наличия ледяного покрова (рис. 1.78, 2), рельефа дна, продольных и поперечных уклонов и других факторов. Для характеристики распределения скоростей по живому сечению на продольный профиль наносят линии равных скоростей течения – изотакхи. В свободном русле распределение скоростей имеет общую закономерность: наибольшими значениями характеризуются глубокие участки ближе к середине русла, затем скорости плавно снижаются до нулевых значений у дна и берега (рис. 1.79, 1).

При наличии ледового покрова, из-за трения о его нижнюю границу, наибольшие скорости смещаются по глубине к середине потока (рис. 1.79, 2).

Для измерений расхода воды и твердого стока выбирается специальный участок реки и гидрометрический створ (сокращенно – гидроствор) согласно



Рис. 1.77. Производство измерений глубин водомерной рейкой. Фото А. Федоровского

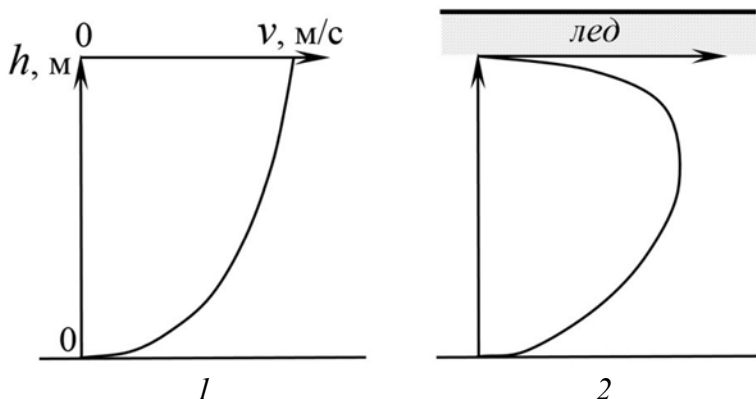


Рис. 1.78. Распределение скоростей течения на вертикали: 1 – открытое русло, 2 – с ледяным покровом

рекомендациям [Наставление..., 1975, 1978; Руководство по гидрологической практике..., 2011, 2012]. К широко применяемым в настоящее время приспособлениям и оборудованию для измерения скорости течения относятся поверхностные и глубинные поплавки, гидрометрические вертушки, акустические и индукционные измерители.

Поплавки. Поплавками в гидрометрии называют предметы и приспособления легче воды, свободно перемещающиеся водным потоком. Скорость течения поплавками определяется по формуле $v = L/t$, где L – пройденное поплавком расстояние в метрах за время t в секундах.

Принято разделять поплавки по типам: поверхностные, глубинные, поплавки-интеграторы. Поверхностные поплавки служат для измерения скорости и направления течения в приповерхностном слое воды. Хорошо подходят для этих целей поплавки из плотного пенопласта, размер которых меняется от ширины и глубины потока от 5 до 20–30 см. Находят применение частично заполненные водой пластиковые емкости. В любом случае поплавки должны быть пронумерованы, не обладать парусностью (в противном случае ветер будет искажать и скорость, и траекторию движения поплавков) и быть хорошо заметными для наблюдателя. Поэтому поплавки часто снабжают флажками.

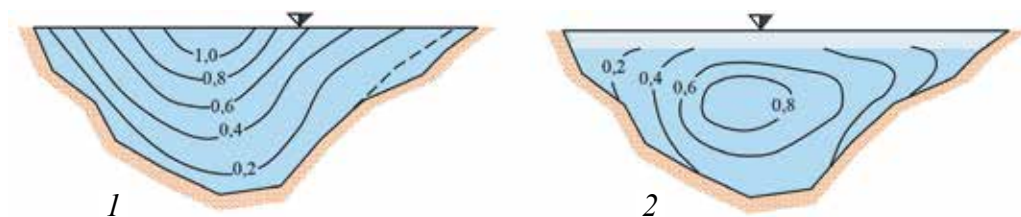


Рис. 1.79. Распределение изолиний скоростей (в м/с) по живому сечению свободного (1) и покрытого льдом русла (2)

На больших реках принято делать крестообразные поплавки из вертикально соединенных досок (1×1 м), снабженные грузом для притопления и заметным флагом с номером поплавка. В свое время были распространены методики измерения скорости течения на больших реках аэрометодами с помощью поплавков с красителем, оставляющим на воде яркое пятно, заметное с воздуха [Орлова, 1974].

Глубинные поплавки служат для измерения скоростей течения в различных точках вертикали. Применяют те же заполненные водой пластиковые емкости так, чтобы поплавок погрузился в воду и находился там во взвешенном состоянии. На поверхности помещают указатель в виде поверхностного поплавка, который существенно меньше глубинного и соединен с ним нитью. Поплавки-интеграторы служат для измерения средней скорости на скоростной вертикали. Принцип измерения основан на всплывании поплавка, принудительно опущенного на дно, и определении пройденного им горизонтального расстояния за определенное время.

Речные гидрометрические вертушки. Существует много видов вертушек отечественного и зарубежного производства [Клименко, 2010]. В свое время наибольшее распространение получили вертушки ГР-21М, ГР-55, ГР-99, которые и поныне используются в гидрологической практике. Индекс «ГР» означает: гидрологический речной; он обозначает все речные приборы и оборудование. Эти приборы служат для определения скорости течения жидкости по частоте вращения лопастного винта. На рис. 1.80 показано устройство гидрометрической вертушки ГР-21М с вариантом ее крепления на вертлюге 10 (над вертлюгом имеется скоба, крепящая его к тросу лебедки, снизу вертлюг крепится аналогичной скобой к рыбовидному грузу).

Вертлюг на рисунке вставлен во втулку корпуса и закреплен двумя винтами 11. Он позволяет вертушке свободно вращаться в горизонтальной плоскости

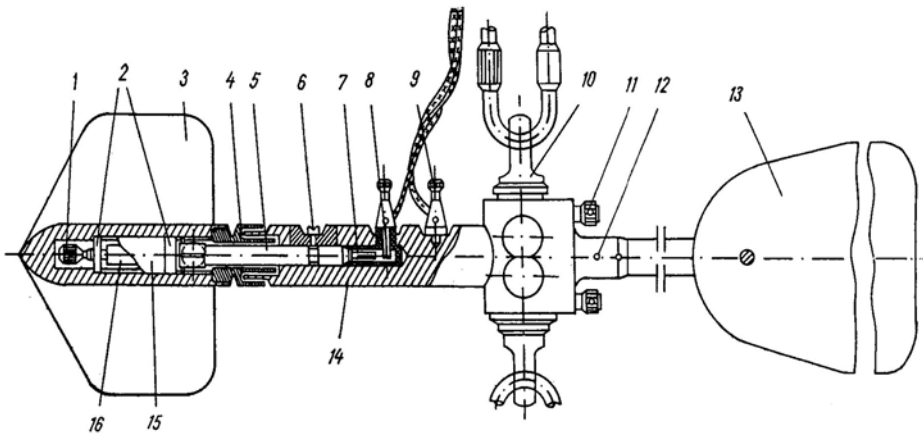


Рис. 1.80. Схема гидрометрической речной вертушки ГР-21М. Обозначения в тексте

на тросе, а хвостовое оперение-стабилизатор 13 ориентирует вертушку лопастным винтом 3 против течения. Предусмотрен вариант установки вертушки на трехметровой гидрометрической штанге ГР-56, вставляемой во втулку корпуса вместо вертлюга. Сбоку втулка имеет фигурную прорезь с указателем для снятия отсчета положения вертушки на штанге. Корпус в передней части вертушки имеет полость, в которую вставляется ось собранной ходовой части 5 и крепится в ней стопорным винтом 6. Две клеммы, 8 (изолированная) и 9 (соединенная с корпусом), служат для подключения проводов сигнальной цепи. Ходовая часть вертушки состоит из неподвижной оси 5 с контактным механизмом, включающим червячную шестерню, контактный штифт, пружину, винт и электропроводный стержень, соединяющий контактную пружину с гнездом штепселя 7. Лопастный винт 3 крепится накладной гайкой 4 к ее передней части, а конструкция из двух радиально-упорных подшипников 2, распираемых внутренней 16 и наружной 15 втулками и удерживаемых гайкой 1, позволяет ему свободно вращаться под воздействием набегающего потока жидкости. Втулка 15 имеет внутри зубцы для передачи вращательного момента лопатного винта червячной шестерне в соотношении 20 : 1.

Сигнальное устройство, состоящее из панели, звонка, лампочки и переключателя, устанавливается в деревянном ящике (рис. 1.81) и с помощью двухжильного провода соединяется с клеммами 8 и 9 корпуса (рис. 1.80). Питание электрической цепи осуществляется от источника постоянного тока напряжением 3 В. Вес комплекта с упаковочным ящиком составляет около 6 кг.



Рис. 1.81. Упаковочный ящик с сигнальным устройством и вертушкой ГР-21М в транспортном положении

Принцип действия вертушки основан на связи количества оборотов лопастного винта вертушки со скоростью потока воды. Вместе с лопастью вращается втулка 15, которая передает вращение лопасти на червячную шестерню. Контактный механизм вертушки замыкает электрическую сигнальную цепь через каждый полный оборот червячной шестерни, что соответствует 20 оборотам лопасти вертушки.

В момент замыкания цепи вспыхивает лампочка или звенит звонок, что дает возможность фиксировать число оборотов лопастного винта вертушки. С помощью секундомера определяют время с начала работы вертушки (сигнал) до каждого последующего сигнала. Подсчитав общее число оборотов

лопасти вертушки и разделив их на время ее работы, определяют частоту вращения лопастного винта (число оборотов в секунду). Для перехода от частоты вращения лопастей вертушки n (1/с) к скорости течения воды v в м/с используют *тарировочную кривую* – график зависимости между скоростью течения и числом оборотов лопастного винта: $v = f(n)$. Прибор подлежит обязательной периодической тарировке не реже 1 раза в 2 года или после ремонта. Малые скорости течения из-за трения подшипников не приводят лопастный винт во вращение. Наименьшая скорость u_0 , при которой силовое воздействие потока на лопастный винт равно величине сопротивлений, а лопастный винт вращается неравномерно, называется начальной *скоростью* вертушки. Для вертушки ГР-21М начальная скорость, при которой винт начинает вращаться, составляет 0,08, а наибольшая – 5 м/с.

Вертушка ГР-55 имеет аналогичную конструкцию и отличается в основном лопастным винтом меньшего диаметра. Это позволяет использовать ее для измерения скорости течения при малой глубине. Из-за небольшого винта увеличилась до 0,09 м/с начальная скорость вращения вертушки. Гидрометрическая речная вертушка ГР-99 представляет собой дальнейшее развитие линейки вертушек ГР-21М и ГР-55. Характеризуется передаточным отношением контактной группы 1 : 1, т.е. за один оборот лопастного винта формируется один импульс в сигнальной цепи. Регистрация числа оборотов вертушки осуществляется полуавтоматическим электромагнитным счетчиком, запускаемым вначале измерения скорости потока вместе со встроенным стандартным секундомером вручную.

Отечественная промышленность выпускает современные гидрометрические измерители скорости. К ним относится ИСТ 1-0,06/120/70 – измеритель скорости течения (в дальнейшем – ИСТ). Это новое поколение гидрометрических вертушек (ВГ-1-120/70) с герконовым датчиком импульсов и электронным регистратором, обеспечивающим непосредственный отсчет результатов измерения скорости течения в цифровой форме на табло в м/с (рис. 1.82).

В этой линейке приборов измеритель скорости потока ИСП-1М (рис. 1.83). Он унаследовал от ИСТ контактное устройство на основе геркона, формирующего электрический импульс



Рис. 1.82. Измеритель скорости течения ИСТ 1-0,06/120/70 с вертушкой (ВГ-1-120/70).

Фото А. Федоровского



Рис. 1.83. Измеритель скорости потока ИСП-1М в упаковочном ящике. Фото с сайта <http://www.анероид.рф/catalog/gidrologiya/mikrovertushki/isp-1m.htm>

компьютер по кабелю через порт USB. Данные мгновенных и осредненных скоростей накапливаются в файле с указанием даты и времени момента измерения. Для осуществления передачи данных измерений вместе с измерителем поставляется необходимое программное обеспечение.

Безлопастные измерители скорости. Многие годы развивается система измерителей скорости течения воды на других физических принципах – без



Рис. 1.84. Микровертушка ГМЦМ-1 в комплекте с кабелем и регистратором. Фото с сайта <http://hydrotecpribor.ru>

через каждый оборот лопастного винта, более компактный и менее энергоемкий электронный регистратор.

Для измерений в условиях ограниченной глубины служит измеритель скорости течения воды ГМЦМ-1 (рис. 1.84). Комплект состоит из микровертушки с соединительным кабелем и электронного регистратора. Вертушка имеет корпус со втулкой для крепления прибора на стандартной гидрометрической штанге и держателем лопастного винта, изготовленного из высокопрочной водостойкой пластмассы. Цифровой регистратор непосредственно показывает величины скорости водного потока.

Вертушка комплектуется лопастными винтами диаметром 15 и 25 мм. Диапазон измерения скорости – от 0,03 до 6,0 м/с. В этой модификации добавлена функция передачи данных измерений на

вращающегося потоком лопастного винта. Примером может служить индукционный измеритель скорости потока немецкой фирмы ОТТ (рис. 1.85).

Диапазон измерения скоростей от практически нулевых до 2,5 м/с.

Профилографы. Дальнейшее совершенствование технических средств, применяемых в полевой гидрологии, привело к появлению измерительных комплексов, автоматизирующих

практически все виды гидрометрических измерений. Применительно к рекам они получили названные профилографы. На сети Росгидромета распространены акустические профилографы Rio Grande (рис. 1.86, 1) и Stream Pro (рис. 1.86, 2), измерение скорости течения и глубин потока в которых основано на доплеровском эффекте. Двигаясь по гидрометрическому створу реки с помощью автономного двигателя или на тросе, профилограф непрерывно посылает вертикально от поверхности воды ко дну реки короткие акустические импульсы фиксированной частоты. Отраженный от частиц в воде сигнал получает доплеровский сдвиг в частоте, пропорциональный скорости потока. Измерения проводятся 4 лучами, что позволяет оценить положение на створе, крен (боковой наклон) и дифферент (продольный наклон) датчика и точно измерить скорость, направление течения и глубину потока. По результатам непрерывных измерений скорости потока на вертикалях и глубины по ходу перемещения профилографа по створу вычисляется расход воды. Для этого необходимо пересечь поток от одного берега до другого.

Профилограф Rio Grande применяют главным образом на реках с глубинами до 21 м и скоростями течения до 5 м/с. Шаг по глубине – 5 см. Профилограф Stream Pro рекомендован для рек с глубинами до 4–6 м и скоростями течения до 2 м/с. Шаг по вертикали здесь составляет 1 см. Минимальная глубина, необходимая для работы обоих приборов, 0,3 м. Данные, полученные в процессе работы профилографов, обрабатываются специализированной программой



Рис. 1.85. Индукционный измеритель скорости. Фото с сайта <http://geolink.ru>



Рис. 1.86. Акустические профилографы Rio Grande (1) и Stream Pro (2) Фото с сайта <http://tech.meteorf.ru>

прилагаемого к комплекту переносного компьютера, который связывается с прибором кабелем или беспроводной связью Bluetooth.

Производство измерений скоростей течения. Различают точечный и интеграционный способы измерения скорости течения. При точечном способе скорость течения измеряется в ряде точек на вертикали. Интеграционный способ заключается в измерении средней скорости на вертикали или сразу во всем живом сечении русла. Служит для ускорения процесса измерений, однако большого распространения не получил из-за сложности реализации и возникающих ошибок [Орлова, 1974]. Применялся на постах сети Росгидромета, оборудованных специальными тросовыми установками типа ГР-70 (для рек менее 100 м) и ГР-101 (от 100 до 200 м). Современные профилографы в своей основе рассчитаны на интеграционный метод оценки как скоростей течения, так и расхода воды. Точечный способ широко распространен для изучения распределения скоростей в потоке с помощью гидрометрической вертушки в научных целях. В этом случае количество точек определяется программой исследования и может быть очень большим. При оценке расхода воды различают многоточечный (детальный), основной и сокращенный способы.

Многоточечный способ предполагает измерение скорости в 5 и более точках скоростной вертикали. Измерение в 5 точках (за ним закрепилось название детальный) производят: в приповерхностном слое, на 0,2; 0,6; 0,8 рабочей глубины и в придонном слое (рис. 1.87).

Детальный способ применяют при изучении скоростного режима при выборе гидроствора для постоянных измерений, при построении так называемой

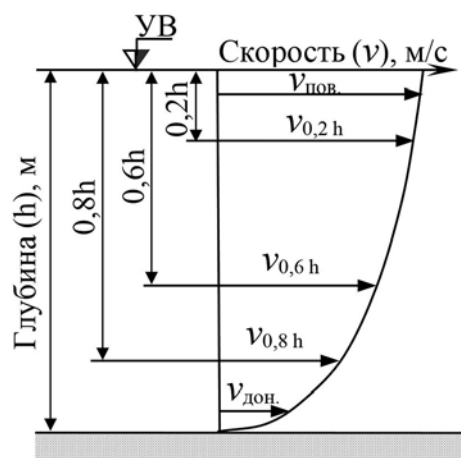


Рис. 1.87. Измерение скоростей течения на вертикали пятиточечным способом. Глубина погружения вертушки у поверхности и у дна определяется диаметром лопастного винта вертушки

кривой расходов и в некоторых других случаях. Большее количество точек на вертикали используют в научных целях.

Основной способ предусматривает измерение скорости на 0,2 и 0,8 рабочей глубины, *сокращенный* – на 0,6 рабочей глубины. Их применяют для уменьшения времени измерений и объема работ в предварительно изученных с помощью детального способа условиях на постоянных гидростворах. Способ находит применение при предварительных изысканиях для ориентировочных оценок скоростного поля.

Средняя скорость на вертикали вычисляется при расчетах расхода воды через поперечный створ. Различают способы: аналитический, графический

и графо-аналитический [Орлова, 1974]. Наиболее часто применяют аналитический способ, два других – в особенно сложных условиях распределения скоростей на вертикали. Аналитический способ предусматривает вычисление средней скорости в пяти точках по формуле: $v_{cp} = 0,1 \times (v_{нов} + 3v_{0,2} + 3v_{0,6} + 2v_{0,8} + v_{дон})$, в двух и одной точках – соответственно $v_{cp} = 0,5 \times (v_{0,2} + v_{0,8})$ и $v_{cp} = v_{0,8}$.

Измерение скорости поплавками – наиболее доступный способ оценить скорости течения небольших рек, однако может быть использован и для больших рек. Одна из главных проблем применения поплавков – условия пуска и наблюдения за их ходом по всей ширине реки. На горных реках с бурным потоком, где поверхностный поплавок попадает в водовороты, области с обратным течением, использовать поплавки нельзя [Наставление..., 1978].

Наставление рекомендует следующий порядок измерения скорости течения поплавками на малых реках. На равных расстояниях выше и ниже гидроствора, на котором уже произведены промеры глубин, назначаются два дополнительных створа. Расстояние выбирается так, чтобы время хода поплавков между смежными створами составляло не менее 10 с. Створы оборудуются тросами, размеченными через 1 м марками с номерами. Поплавки пускаются несколько выше верхнего створа в намеченных точках начиная со стрежня (области потока с наибольшей скоростью течения). Метод пуска зависит от условий. При малых глубинах поплавки пускаются вброд, при больших – с лодки. Часто рекомендуемый метод забрасывания поплавков с берега предполагает большой навык и слаженную работу всей бригады, так как помещение поплавка в нужное место на створе требует многократных попыток, часто сбивающих наблюдателя на нижнем створе ложными пусками. В момент прохождения поплавка через верхний створ включается секундомер и отслеживается траектория движения поплавка с тем, чтобы зафиксировать с помощью размеченного троса место пересечения гидроствора. В момент прохождения нижнего створа секундомер выключается.

Расходом воды, как уже отмечалось, называется ее объем, перемещающийся через живое сечение русла за единицу времени. Существуют различные приемы оценки расходов воды. При возможности выполнить промеры глубин и измерить скорость течения вертушкой или поплавками применяют так называемый способ скорость–площадь. Если скорость течения оценить сложно, но есть данные о площади поперечного сечения, уклонах водной поверхности, применяют способ уклон–площадь, который относится к гидравлическим. Сюда же следует отнести учет стока с помощью водосливов и других гидротехнических сооружений. На горных реках практикуют способ смещения, когда в поток добавляют электролит (например, раствор поваренной соли) и измеряют изменение электропроводности воды. Расходы небольших источников, родников измеряют объемным способом.

Измерения расходов воды, взвешенных и влекомых наносов организуется на гидрометрическом створе (гидростворе) – линии, перпендикулярной направлению течения реки, закрепленной на местности по возможности тростовой переправой или створными знаками для больших рек. Перпендикулярность гидроствора течению вначале оценивается визуально, а затем уточняется изучением направлений течения поплавками. При изысканиях на малых реках направление гидроствора чаще всего задается визуально и закрепляется размеченным тросом.

Выбор участка реки для устройства гидроствора производится в соответствии с рекомендациями [Наставление..., 1978; Руководство по гидрологической практике..., 2011, 2012]. Это должен быть прямолинейный участок длиной не менее 8–10 ширин реки с течением, параллельным берегам и минимальными скоростями не ниже 0,1–0,2 м/с (выше начальной скорости вращения вертушки). На середине этого участка и устанавливается гидроствор. Здесь же желательно разместить и водомерный пост. Выше и ниже гидроствора располагаются посты для наблюдений за уклонами водной поверхности. На малых реках часто требуется выровнять и очистить русло на 10–15 м выше и ниже гидроствора от коряг, больших валунов и других препятствий, мешающих выполнять промеры глубин и искажающих скоростное поле.

С понятием «гидроствор» связан ряд определений. Так, пересечение гидроствора с линией берега называют *урезом воды* соответственно левого берега (у.л.б.) и правого берега (у.п.б.). Поперечное сечение реки по гидроствору делят на так называемые *живое сечение* и *мертвое пространство*. К живому сечению реки относят часть поперечного сечения, в пределах которого наблюдается однонаправленное движение воды. Мертвые пространства, располагающиеся обычно у берегов с непрямолинейной конфигурацией, характеризуются отсутствием или обратным течением. Точки гидроствора, в которых производят измерение глубин, называют *промерными вертикалями*, а скоростей течения – *скоростными вертикалями*.

После закрепления на местности гидроствора производится промер глубин. Если предполагаются длительные наблюдения, выполняется нивелирование трассы вдоль линии гидроствора на пойме до незатопляемого коренного берега (склона). Эти данные могут пригодиться для расчета площади поперечного сечения, когда измерить глубины непосредственно небезопасно (например, в большие паводки с выходом воды на пойму). Промерные вертикали рекомендуется располагать через равные промежутки по ширине реки. Их количество определяется рельефом дна и подбирается таким образом, чтобы площадь поперечного сечения была подсчитана наиболее точно. На реках шириной менее 20 м рекомендуется назначать промерные вертикали через 0,5–1,0 м. Скоростные вертикали назначают в зависимости от способа измерения расхода воды. В научных целях чаще всего применяется многоточечный

способ. Здесь скоростные вертикали назначаются через одну промерную вертикаль.

Измерение расхода воды вертушкой связано со следующими работами. Вначале готовится оборудование и оформляется расходная книжка с указанием состояния реки и погодных условий. Производится измерение уровня воды на водомерном посту в начале и конце работ. Выполняются промеры глубин и измерение скоростей течения одним из имеющихся способов, измеряются уровни воды на уклонных постах для определения продольного уклона водной поверхности (на временных гидростворах эти наблюдения могут отсутствовать). По результатам измерений производится вычисление расхода воды аналитическим или графическим методами. Последний наиболее точен и применяется в особенно сложных условиях распределения скоростей течения из-за ледовых явлений, деформаций русла и т.п. Аналитический метод принят в качестве стандартного, расход воды вычисляется в соответствии со схемой

на рис. 1.88 по формуле: $Q = k_0 v_1 f_0 + \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) f_1 + \dots + \left(\frac{v_{n-1} + v_n}{2} \right) f_{n-1} + k_n v_n f_n$.

Здесь Q – полный расход воды через живое сечение, который состоит, как видно из формулы и рисунка, из частных расходов в так называемых *отсеках* живого сечения. Для наглядности отсеки показаны в трехмерном пространстве «глубина–ширина–скорость» и отделены друг от друга. Средние скорости течения на 1-й, 2-й, ..., n -й (последней) скоростных вертикалях обозначены соответственно как $v_1, v_2, \dots, v_n$. Буквами f_0 и f_n указываются площади водного сечения между берегами (мертвое пространство) и, соответственно 1-й и n -й промерной вертикалью. Площади водного сечения между другими промерными вертикалями обозначены буквами $f_1, f_2, \dots, f_{n-1}$. Коэффициенты k_0 и k_n применяются для расчета средней скорости на прибрежных участках водного сечения. Они изменяются от 0,7 для пологих берегов с нулевой глубиной на

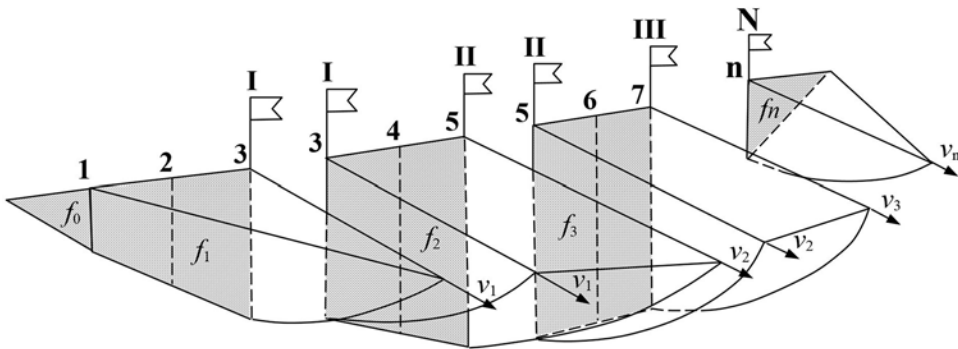


Рис. 1.88. Блок-схема к расчету расхода воды аналитическим методом. Цифрами обозначены промерные вертикали, номера скоростных вертикалей показаны римскими цифрами и помечены флажками

урезе и 0,8 для обрывистых берегов до 0,5 при наличии у берега мертвого пространства.

Вычисление расхода воды по скоростям, измеренным поверхностными поплавками, производится описанным выше аналитическим методом. Как и при измерении скоростей вертушкой, принимаются данные измеренного уровня воды, площади водного сечения (F), уклона водной поверхности (I). Скорости на 5–6 вертикалях, совмещенных с промерными, оценивают на основании пусков поплавков путем построения специального графика на клетчатке. По оси, совпадающей с направлением течения, откладывают продолжительность хода поплавков. По оси, совпадающей с гидроствором, откладывают расстояние от постоянного начала. Наносятся точки, соответствующие удачным пускам поплавков, и проводится средняя линия – эпюра распределения продолжительности хода поплавков. По ней оценивают поверхностную скорость на выбранных скоростных вертикалях. В крайнем случае (неудачные пуски) оценивают наибольшую скорость на стрежне, которая, как правило, определяется наиболее хорошо. Затем с выбранными данными рассчитывают фиктивный расход воды Q_{ϕ} из-за использования поверхностной, а не средней скорости на вертикали. Переход к действительному расходу воды Q_d осуществляется по соотношениям $Q_d = k_1 Q_{\phi}$ или $Q_d = k_2 v_{\text{наиб.}} F$ для наибольших скоростей, в которых переходные коэффициенты k_1 и k_2 устанавливаются экспериментально путем сопоставления синхронно измеренных расходов вертушкой и поплавками или по экспериментальным формулам [Наставление..., 1978]. Для приближенных оценок рекомендуется табл. 1.21.

Для рекогносцировочных оценок расходов воды по скоростям, измеренным поверхностными поплавками, на малых реках может быть принят коэффициент 0,75.

Обеспечение точности измерений глубин, скоростей течения и расходов воды на малых реках представляет собой проблему [Наставление..., 1978;

Таблица 1.21. Приближенные значения коэффициентов k_1 и k_2 при отсутствии опытных данных по: [Железняков, 1981]

Характеристика русла, поймы (условия течения)	Средняя глубина, м					
	меньше 1		1–5		больше 5	
	k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2
Прямые, чистые, земляные (глина, песок), галечные, гравийные	0,80	0,64	0,84	0,66	0,86	0,67
Извилистые, частично поросшие травой, каменистые. Поймы сравнительно разработанные (травя, кустарник)	0,75	0,60	0,80	0,63	0,83	0,65
Извилистые с крупными валунами. Значительно заросшие, как и пойма с глубокими промоинами	0,65	0,55	0,74	0,59	0,80	0,62
Поймы сплошь лесного таежного типа	0,57	0,46	0,69	0,56	0,75	0,60

Федоровский, 1985]. Недостаточные глубины, каменистость горных и засоренность равнинных русел малых рек, их деформируемость осложняют применение стандартных гидрометрических методов измерений. Вследствие высокой изменчивости стока, особенно горных и полугорных рек, очень велико различие между минимальными и максимальными расходами воды.

В паводок река разливается, выходит на пойму. Скорости течения возрастают до 1–2 м/с. Измерять скорости ни вброд, ни с лодки невозможно. В этих условиях помогают такие гидрометрические сооружения, называемые иногда расходомерами, как контрольные русла и гидрометрические мостики, а также водосливы и гидрометрические лотки. При большом диапазоне изменения расходов воды применяют комбинированные методы учета стока. Небольшие расходы измеряют с помощью водосливов с треугольным вырезом, средние – лотками, большие – вертушкой в контрольном русле с гидрометрического мостика, катастрофические – расчетными методами по уравнению Шези [Наставление..., 1978; Руководство по гидрологической практике..., 2011, 2012].

Водосливами измеряют расходы воды от самых малых до 30–40 м³/с. Для измерения небольших расходов применяют тонкостенные незатопленные водосливы чаще всего треугольного профиля (рис. 1.89).

Водослив устанавливается на выходе водоподводящего канала, упорядочивающего течение. Важное требование заключается в обеспечении нулевой скорости подхода воды и соблюдении характерных размеров водосливной стенки (плотины), указанных на рисунке. Угол выреза θ зависит от наибольшего расхода и выбирается обычно равным 45 или 60°, реже 90 или 120°. Напор H , измеряемый водомерной рейкой на расстоянии от водослива не ближе чем три величины наибольшего напора, рекомендуется задавать от 0,06 до 1 м. Расход воды через водослив вычисляется по формуле, по величине напора и угла выреза:

$$Q = \frac{8}{15} \mu \sqrt{2g} \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) H^{\frac{5}{2}}, \quad (1.91)$$

где μ – коэффициент расхода, равный 0,58–0,59.

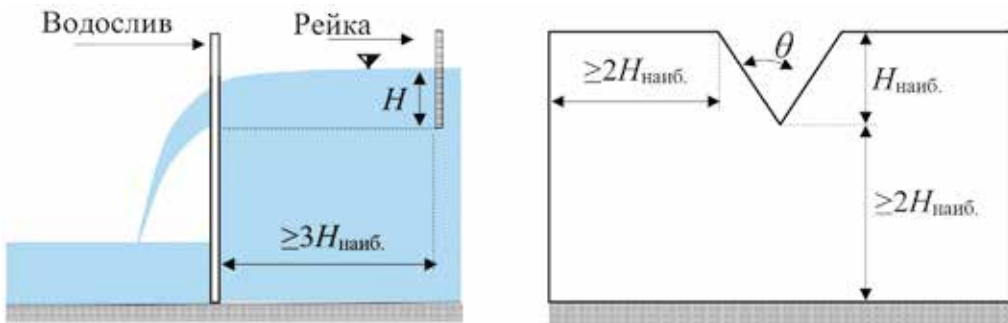


Рис. 1.89. Тонкостенный водослив с вырезом в форме равнобедренного треугольника

Находят также применение водосливы с прямоугольным, трапецеидальным и другими вырезами. Большие расходы воды измеряют с помощью водосливов так называемого практического профиля и с широким порогом. В местах постоянного учета стока часто возводят целый комплекс сооружений (рис. 1.90). В состав приведенного на рисунке гидротехнического сооружения входит подводящий канал (1), водослив (2), гидрометрический мостик (3), самописец напора воды над гребнем водослива (4) с телекоммуникационным оборудованием (5). Подводящий канал одновременно является контрольным руслом, в котором с мостика могут быть произведены измерения расходов воды вертушкой для тарировки водослива.

Такие сооружения часто устанавливаются на оросительных системах, на которых требуется точный учет воды, израсходованной на полив сельскохозяйственных культур, и составление общего водного баланса. Пример временного гидротехнического сооружения на равнинной реке в виде комбинации водослива практического профиля (1) и водослива с прямоугольным вырезом (2) приведен на рис. 1.91.

Здесь также имеется водомерная рейка (3) и павильон с самописцем (4) уровня воды (напора над гребнем водосливов). Малый водослив с прямоугольным вырезом (2) служит для измерения небольших расходов воды. Когда расход воды увеличивается и вода начинает переливаться через гребень (1), учет стока ведется по обоим водосливам.



Рис. 1.90. Постоянное гидротехническое сооружение для автоматизированного измерения расхода воды с помощью водослива. Обозначения в тексте. Фото с сайта <http://www.intechopen.com>

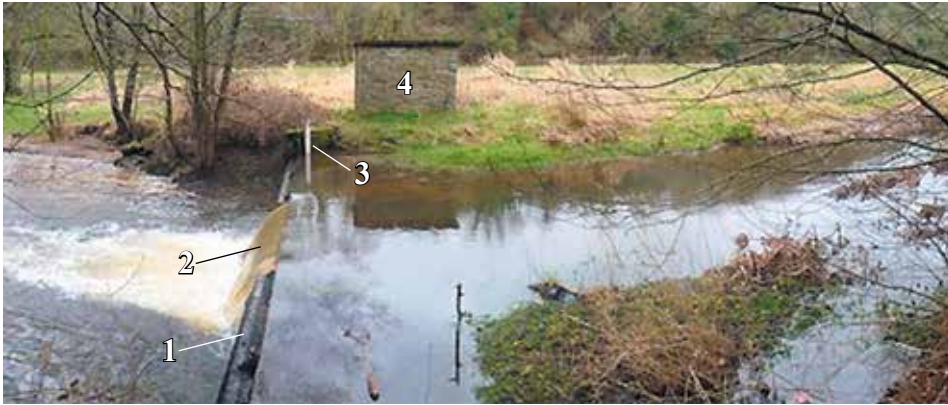


Рис. 1.91. Временное сооружение для автоматизированного измерения расхода воды с помощью комбинации прямоугольного водослива (2) и водослива практического профиля (1). Остальные обозначения в тексте. Фото с сайта <http://www.yorkshirewalks.org/diary12/diary456.html>

Определение расхода воды методом «площадь–уклон». Невозможность расчета средней скорости течения реки инструментальными методами при неблагоприятных условиях ведет к необходимости применения гидравлического подхода к ее вычислению. Такие условия возникают довольно часто во время прохождения катастрофических паводков на больших и средних реках, связанных с выходом воды на пойму, на которой учесть разнообразие скоростей течения не представляется возможным. Как отмечалось ранее, уклоны водной поверхности служат для оценки скорости течения воды по формуле Шези: $V = C \cdot \sqrt{R \cdot I}$, где C – коэффициент Шези, учитывающий сопротивление течению; R – гидравлический радиус: отношение площади поперечного сечения створа F к длине линии дна на поперечном профиле (смоченный периметр χ). На неглубоких реках R обычно заменяется средней глубиной H_{cp} . Расход воды при этом рассчитывается по формуле $Q = F \cdot C \cdot \sqrt{R \cdot I}$. Значение коэффициента Шези для больших и средних рек может быть оценено обратным расчетом по данным измеренных расходов воды: $C = \frac{v_{cp}}{\sqrt{h_{cp} \cdot I}}$, где $v_{cp} = Q/F$;

$h_{cp} = F/B$, где B – ширина реки. Следует отметить, что определение C должно быть выполнено для всего диапазона уровней воды с тем, чтобы построить зависимость $C = f(H)$. Эта зависимость при необходимости экстраполируется (продолжается) для высоких уровней. Значения коэффициента C снимаются с графика и используются в формуле Шези. Однако чаще всего коэффициент C определяется по формуле Павловского: $C = \frac{1}{n} R^x$, где коэффициент шероховатости n определяется по специальным таблицам [Караушев, 1955], выдержки из которых приведены в табл. 1.22. Значение показателя степени x вычисляется

Таблица 1.22. Значения назначенных коэффициентов шероховатости, оцененных по Срибному [Караушев, 1955]

№ п/п	Характеристика русла	Коэффициент n
1	Прямые, незасоренные, со свободным течением русла	0,02
2	Сравнительно чистые русла равнинных рек, с незначительной извилистостью или прямые с отмелями и каменистым дном	0,04
3	Русла больших и средних рек значительно засоренные, извилистые и частично заросшие, каменистые с беспокойным течением. Галечно-валунные реки горного типа	0,06
4	Реки и поймы сильно заросшие. Валунные, горного типа, русла с бурливым, пенистым течением	0,08
5	Поймы, сильно заросшие с сильно неправильными косоструйными течениями. Горно-водопадного типа русла с крупновалунным, извилистым строением ложа	0,10
6	Горно-водопадного типа русла с крупновалунным, извилистым строением ложа. Реки болотного типа (заросли, кочки). Поймы с очень большими мертвыми пространствами (озерами и пр.)	0,12–0,14

по эмпирической формуле $x = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,10)$ [Орлова, 1974]. Для общих оценок x часто принимается равным 1/6 [Караушев, 1955].

Площадь поперечного сечения F определяется по результатам проведенного ранее (при низкой воде в межень) нивелирования поперечного профиля до отметок высоких вод. Продольный уклон для установившегося течения может быть принят равным уклону русла или поймы. Так как условия на пойме существенно меняются от места к месту, расчет ведется по отсекам поймы, в пределах которых может быть назначен свой уклон и коэффициент шероховатости.

Основы подсчета речного стока. Оценить сток реки с необходимой точностью – сложная инженерно-гидрологическая задача. При благоприятных условиях, когда существует однозначная связь между расходами и уровнями воды: $Q = f(H)$, называемая кривой расходов (рис. 1.92), значение расхода на каждый день можно установить по величине среднего суточного уровня на водомерном посту. Именно этот подход применяется на большинстве пунктов наблюдения за стоком Росгидромета. К неблагоприятным условиям, нарушающим зависимость $Q = f(H)$, относят неустойчивость русла, ледовые явления, зарастание русла, переменный подпор и др. В таких условиях применяют специальные приемы подсчета стока [Лучшева, 1972; Орлова, 1974; Наставление..., 1978; Руководство по гидрологической практике..., 2011, 2012]. Хорошим решением многих проблем служит создание рассмотренных выше гидрологических расходомеров (водосливов и т.п.).

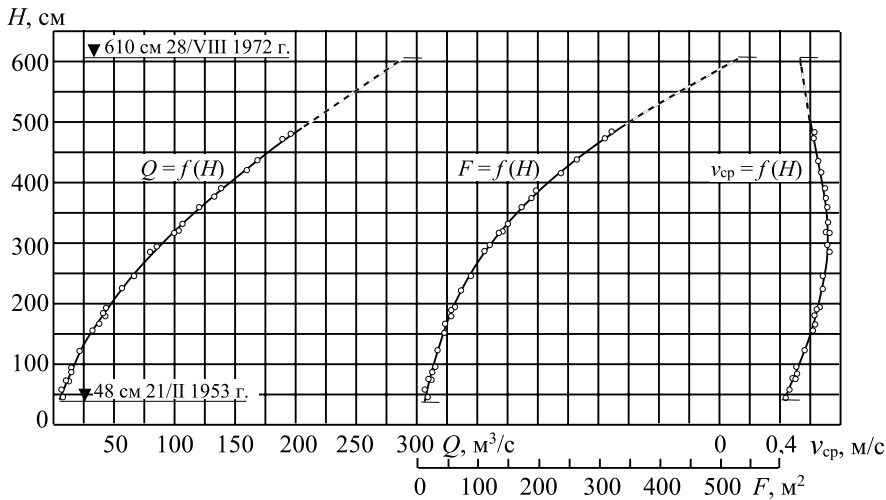


Рис. 1.92. Кривые зависимости расхода воды (Q), площади поперечного сечения (F) и средней скорости ($v_{\text{ср}}$) от уровня воды (H) на гидростворе. Пунктиром показана экстраполяция кривых за пределами инструментальных измерений

Для построения кривой расходов: $Q = f(H)$ за период открытого русла (обычно графически вручную или с помощью электронных таблиц) используются обобщенные данные измерений 25–30 расходов воды, покрывающих диапазон изменения уровней воды не менее чем на 75–80 %. На этом же графике строятся вспомогательные зависимости $F = f(H)$ и $v_{\text{ср}} = f(H)$. При этом оставшиеся 20–25 % диапазона уровней могут быть покрыты путем экстраполяции кривых. Кроме таблицы «Измеренные расходы воды» (ИРВ), используется таблица «Измеренные уровни воды» (ЕУВ), поперечный профиль по гидроствору, план участка и другие материалы, в том числе материалы по учету стока за другие годы.

На основании формулы расхода $Q = F \cdot v_{\text{ср}}$ производится так называемая увязка кривых. При этом среднее отклонение расхода по формуле и снятого с кривой расходов не должны превышать 1 % для всего диапазона изменения уровней воды. В противном случае положение кривых уточняют. Затем составляется таблица координат кривой расходов $Q = f(H)$ и выполняется окончательная проверка кривой путем сравнения измеренных расходов воды и найденных по таблице координат при одном и том же уровне. Если среднее отклонение находится в пределах 2–4 %, кривую расходов (таблицу координат) принимают для расчетов.

Ежедневные расходы воды за период открытого русла определяются непосредственно по таблице координат кривой расходов по значениям среднего суточного уровня из таблицы ЕУВ.

1.3.3. Оценка стока переносимых водой веществ

Перемещение водой того, что в ней растворено, относят к *стоку растворенных веществ*; все остальное – к *стоку наносов*. Речные наносы включают минеральные вещества: песок, гальку, валуны и нерастворенные в воде органические вещества: ил, гумус и др.

Количество наносов, переносимых через живое сечение потока за определенное время (секунда, сутки, год), называется *стоком наносов* или стоком твердых веществ, и выражается в килограммах или тоннах. Наносы и донные отложения изучаются также по составу (гранулометрический анализ), особенностям наслоения (стратификационный анализ) и другим характеристикам. Равнинные реки основную долю твердого стока (более 90 %) перемещают во взвешенном состоянии. На горных реках доля взвешенных наносов в общем объеме твердого стока снижается. *Расход взвешенных наносов* R (в кг/с) рассчитывают на основе измерений *мутности воды* ρ (в г/м³). Из отобранных проб фильтрованием выделяют твердые вещества, вес которых относят к объему пробы. Получили распространение приемы оценки мутности непосредственно в потоке. Вычисление расходов взвешенных наносов выполняется графическим или аналитическим способом [Орлова, 1974]. Для точного учета количества взвешенных наносов расход вычисляется с учетом их распределения по глубине и ширине реки. Для предварительных оценок количества взвешенных наносов или в реках со слабой мутностью часто отбирают суммарную пробу, характеризующую среднюю мутность живого сечения. В этом случае расход взвешенных наносов в кг/с вычисляется по формуле:

$$R = 0,001\rho_{\text{ср}} Q, \quad (1.92)$$

где $\rho_{\text{ср}}$ – мутность суммарной пробы, г/м³; Q – расход воды, м³/с.

Для учетов стока влекомых наносов используют разные конструкции для измерения наносов мелких и крупных фракций. Пробы воды для измерения количества взвешенных наносов в малых реках и для рекогносцировочных оценок отбираются подручными средствами. Для точного учета стока твердых веществ пробы отбираются батометром-бутылкой (рис. 1.93) одновременно с измерением расхода воды.

На реках с сильным течением (более 1,5 м/с) батометр-бутылку, да и другие гидрометрические приборы, опускают на грузе рыболовной формы весом от 5 до 70 кг. Основной принцип выделения *взвешенных* наносов из проб воды заключается в ее фильтровании через специальный бумажный фильтр, заранее высушенный, взвешенный и пронумерованный. Определение крупности частиц наносов (фракционный анализ) производится путем отстаивания пробы. Различают фильтрование под атмосферным и повышенным давлением. В первом случае применяют простейшее химическое оборудование в виде стеклянных или пластмассовых воронок достаточного размера для помещения в них



Рис. 1.93. Батометр-бутылка ГР-16М в сборе, установленный на штанге. Фото с сайта http://www.wikipip.ru/goods/32138806-batometr_gr_16m

обеззоленных бумажных фильтров диаметром 110–130 мм. Поверх фильтра постепенно выливается проба. Особенно мутные пробы требуют последовательного применения нескольких фильтров. Фильтрация занимает много времени. Во втором случае применяют специальные фильтровальные приборы, в которых создается повышенное давление над или пониженное под фильтром и скорость фильтрования существенно возрастает. На рис. 1.94 показан стандартный фильтровальный прибор Куприна ГР-60.

Более современное оборудование для фильтрования проб воды приведено на рис. 1.95. Прибор состоит из одной воронки с фильтром, ресивера, в котором создается разрежение с помощью вакуумного насоса и собирается отфильтрованная вода. Фильтр-влагодотделитель препятствует попаданию капель жидкости в камеру вакуумного насоса. Используется бумажный фильтр диаметром 50 мм. Предусмотрена также конструкция прибора с количеством воронок до 6, что весьма удобно при массовом фильтровании проб.

Широко применяются в лабораторных условиях приборы, в которых мутность воды определяется в пробе или непосредственно в потоке фотометрическим или нефелометрическим способом. В первом случае приборы-турбидиметры определяют мутность по степени ослабления света, во втором – приборы-нефелометры – по рассеиванию в отраженном свете. На рис. 1.96 показан портативный измеритель мутности воды, который может применяться как в лабораторных, так и в полевых условиях.

Большое распространение в нашей стране получили приборы Японской фирмы



Рис. 1.94. Фильтровальный прибор Куприна ГР-60. Фото с сайта http://www.splyse.ru/offer/photo/1577/photo_1.html



Рис. 1.95. Прибор вакуумного фильтрования ПВФ-47НБ. Фото с сайта <http://medprom.ru/>

К общим недостаткам батометров относится нарушение естественного режима движения наносов и невозможность осветить его пространственную неоднородность из-за небольшой ширины приемного лотка. При неровной и плотной поверхности дна есть вероятность ухода части движущихся наносов под лоток, возможно зачерпывание рыхлых донных отложений при установке приборов. Влекомые наносы могут быть измерены батометром Полякова. Этот батометр применяется при скоростях течения не более 0,7 м/с. В целом, аналогичный принцип действия, но более мощную конструкцию имеет батометр



Рис. 1.96. Портативный микропроцессорный мутномер HI 93703 фирмы «Hanna», работающий в единицах мутности FTU. Фото с сайта <http://www.eurolab.ru>

«Horiba», в которых, в зависимости от набора сменных датчиков, наряду с мутностью измеряется еще несколько химических параметров воды, в том числе температура и РН, содержание растворенного в воде кислорода и другие (рис. 1.97).

Точность определения параметров зависит от изношенности датчиков, так как измерительные электроды быстро стареют (предпочтительно использовать датчики, эксплуатировавшиеся не более двух–трех сезонов).

Влекомые наносы измеряют способом улавливания движущихся частиц (фракций) у дна батометрами или сет-

ками. В Горные реки транспортируют также наносы крупных фракций. Для их учета применяют батометры-сетки различных конструкций. Среди них батометр Шамова, представляющий собой сетчатый ящик, устанавливаемый в металлическом кожухе. Размер ячеек сетки определяет наименьший диаметр частиц наносов, улавливаемых батометрами. Батометры опускаются на штанге и удерживаются на месте растяжками. Донные отложения минерального (гравий, галька, песок и др.) и органического происхождения (остатки разложения

Горные реки транспортируют также наносы крупных фракций. Для их учета применяют батометры-сетки различных конструкций. Среди них батометр Шамова, представляющий собой сетчатый ящик, устанавливаемый в металлическом кожухе. Размер ячеек сетки определяет наименьший диаметр частиц наносов, улавливаемых батометрами. Батометры опускаются на штанге и удерживаются на месте растяжками. Донные отложения минерального (гравий, галька, песок и др.) и органического происхождения (остатки разложения

растительных и живых организмов) изучают различными методами. На неглубоких реках с хорошо видимым дном состав отложений может быть определен визуально или с помощью фотографирования.

Для отбора проб с нарушением структуры отложений на реках с течением не более 0,5 м/с нашли широкое применение разного размера дночерпатели грейферного типа. Пробы небольшого объема (до 300 см³) с глубины до 3 м и скоростью течения до 2 м/с можно отбирать с помощью штангового дночерпателя.

Для анализа крупности наносов применяется классификация частиц по их размерам (табл. 1.23). В среднем от 50 до 70 % массы взвешенных наносов на равнинных реках представлено пылевато-илистой фракцией (0,01–0,001 мм). Остальная часть состоит преимущественно из песков с наибольшим размером частиц – 0,1 мм. Горные реки во взвешенном состоянии перемещают кроме песка гравий, гальку, валуны.

В зависимости от крупности частиц и вида наносов применяются различные методы гранулометрического и фракционного анализа: обмер частиц, ситовой анализ и др. [Орлова, 1974]. Традиционно к *гранулометрическому анализу* относят изучение проб, содержащих частицы приблизительно до 0,1 мм, анализ более мелких частиц называют *фракционным*. Гранулометрический анализ включает обмеры крупных фракций проб и ситовой анализ. Из отобранной пробы вначале выделяются наносы крупнее 10 мм. Разделение этой части пробы по крупности (диаметру) производится путем ее просеивания через сита (грохота) с отверстиями от 10, 20, 50 и 100 мм (возможны и другие градации).

Просеивание может выполняться вручную или с помощью специальных вибрационных машин. Формируется несколько групп отложений: мельче 10 мм,



Рис. 1.97. Портативный многопараметрический прибор U-50 фирмы «Horiba» для определения качества воды. Фото с сайта <http://www.horiba.com>

Таблица 1.23. Классификация речных наносов по размеру частиц по: [Орлова, 1974]

Подфракция	Диаметр частиц фракций, мм						
	глина	ил	пыль	песок	гравий	галька	валуны
Мелкие	< 0,001	0,001–0,005	0,01–0,05	0,1–0,2	1–2	10–20	> 100
Средние	–	–	–	0,2–0,5	2–5	20–50	–
Крупные	–	0,005–0,010	0,05–0,10	0,5–1,0	5–10	50–100	–

10–20, 21–50, 51–100 мм и крупнее 100 мм. Наиболее крупные фракции в пробе определяются непосредственным обмером штангелем (тканевой лентой). Средний диаметр может быть получен по формуле $d = A/3,14$ (мм), где A – средняя длина окружностей образца из трех измерений тканевой лентой. Вес каждой фракции определяется на технических весах и выражается в процентах от веса взятой для анализа пробы, включая наносы мельче 10 мм. При этом крупность часто выражается не в абсолютных значениях (средний диаметр частиц), а в виде относительного содержания (в процентах) групп частиц одного размера, называемых фракциями, по отношению к весу абсолютно сухого образца.

Фракционный анализ осуществляется фракциометром и комплектом для пипеточного метода. В обоих случаях анализ наносов основан на оценке так называемой гидравлической крупности частиц, выражающейся в различии скоростей равномерного оседания частиц в установленной вертикально стеклянной трубке. Гидравлическая крупность при этом позволяет определить диаметр частиц (табл. 1.24). В таблице приведена гидравлическая крупность при температуре жидкости 15 °С. Для перехода от фактической температуры воды во время опытов к нормальной температуре (15 °С) применяются переходные коэффициенты, приводимые в инструкциях к приборам.

Расход влекомых наносов определяется по значениям элементарных расходов влекомых наносов g на вертикалях, на которых отбирались пробы по формуле $g = (P \cdot 100)/t \cdot l$, где P – вес наносов в пробе, г; t – продолжительность выдержки батометра на дне, с; l – ширина входного отверстия прибора, см.

Вычисление стока взвешенных наносов за длительные периоды основано на ежедневном отборе единичных проб воды в месте потока, в котором мутность соответствует средней мутности живого сечения реки (устанавлива-

ется специальными исследованиями). Расход взвешенных наносов вычисляется как произведение расхода воды на среднюю мутность реки. Существует также способ оценки стока взвешенных наносов по графику связи между расходами воды и наносов. Сток влекомых наносов также может быть вычислен по графику связи между расходами влекомых наносов и расходами воды [Орлова, 1974].

В состав наблюдений за химическим составом воды входит отбор проб, полевые определения физико-химических свойств воды, полный или сокращенный анализ отобранных проб в стационарных лабораторных условиях. При отборе проб воды

Таблица 1.24. Соотношение между размером и гидравлической крупностью частиц при температуре жидкости 15 °С по: [Орлова, 1974]

Диаметр, мм	Гидравлическая крупность, мм/с
1,0	100
0,5	60
0,2	21
0,1	8
0,050	2
0,010	0,0800
0,005	0,0300
0,001	0,0008

на месте определяются характеристики, подверженные быстрому изменению: температура воды, цвет, прозрачность, вкус, запах, концентрация водородных ионов pH, содержание в воде растворенных газов CO_2 , O_2 , монокарбонатного иона ($\text{CO}_3^{''}$) и некоторые другие. В лаборатории измеряется содержание в воде главных ионов, а также кремния, железа и других химических элементов. Из биогенных веществ наиболее часто определяются формы азота в виде нитратов и нитритов, фосфор в форме фосфатов и др. Часть проб воды для полного анализа консервируется хлороформом (2 мг/л), другая – 25 %-ным раствором серной кислоты (2 мг/л). Определение химических свойств воды производится согласно наставлениям [Руководство..., 2009]. Пробы отбираются в створе водомерного поста чаще всего с поверхности. На больших реках отбор проб может выполняться с различных глубин батометрами. Пример данных определений химического состава воды приведен в табл. 1.25.

Существуют разные классификации природных вод. Например, воду классифицируют по общей жесткости, которая характеризуется содержанием мг-экв. кальция и магния в 1 л. Так, в нашем примере (табл. 1.25) их сумма составляет около 0,6 мг-экв./л, что соответствует очень мягким водам. По минерализации, выражаемой суммой главных ионов, воды р. Комаровка относятся к водам малой минерализации (от 100 до 200 мг/л) [Алекин, 1970].

Органические вещества находятся в воде в растворенном и коллоидном состояниях. Для количественной их характеристики пользуются косвенными показателями, позволяющими судить о суммарном содержании органического вещества. Это органический углерод, азот или фосфор. Как отмечалось выше, органическое вещество в воде окисляется, поэтому для оценки его количества используется так называемая *окисляемость* воды, равная количеству кислорода, расходуемого на его окисление. В зависимости от применяемого окислителя различают *перманганатную* (окислитель KMnO_4) и *хроматную* (окислитель $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) окисляемость. В пресных водах перманганатная окисляемость, выраженная в мгО/л, близка к величине органического углерода, что составляет около половины всего органического вещества. Бихроматная окисляемость более полно характеризует содержание органического вещества [Алекин, 1970]. О количестве органического вещества косвенно можно судить и по биохимиче-

Таблица 1.25. Химический состав воды р. Комаровка, пост Комаровский, 18. IV 1980 г.

Форма выражения анализа	Содержание ионов						Сумма ионов		
	Катионы (<i>K</i>)			Анионы (<i>A</i>)					
	<i>Ca''</i>	<i>Mg''</i>	<i>Na'+K'</i>	<i>HCO₃'</i>	<i>SO₄''</i>	<i>Cl'</i>	ΣK	ΣA	ΣI
мг/л	9,6	1,5	26,8	21,4	59,7	2,8	37,9	83,9	121,8
мг-экв.	0,479	0,123	1,165	0,351	1,243	0,079	1,767	1,673	3,440
% экв.	13,9	3,6	33,9	10,2	36,1	2,3	-	-	100

скому потреблению растворенного в воде кислорода в пробах в течение чаще всего пятисуточного периода в темноте и температуре 20 °С, получившему обозначение БПК₅. Азот, фосфор, а также железо и кремний в различных соединениях относятся к биогенным веществам. Азот и фосфор имеют огромное значение как питательные вещества в развитии жизни в водоемах. Азот встречается в виде неорганических соединений (аммонийных NH₄, нитритных NO₂, нитратных NO₃ ионов) и органических остатков, образованных при распаде белка тканей организмов.

Стоком растворенных веществ называется выносимое рекой за некоторый период количество неорганических веществ в ионно-молекулярном состоянии и органических веществ в виде коллоидов с размером частиц $\leq 10^{-5}$ см. Наиболее изучено ионно-молекулярное состояние вещества, поэтому сток растворенных веществ часто называется ионным, или химическим, стоком [Лучшева, 1972]. Вместе с тем при наличии данных сток органических веществ и биогенов может быть вычислен аналогично. Для вычисления стока ионов за определенный период необходимо оценить ежедневный расход. Вначале оценивается секундный расход на дату взятия пробы воды. Секундный расход растворенных веществ S в кг/с вычисляются по формуле:

$$S = aQ/10^3, \quad (1.93)$$

где a – минерализация, мг/л или г/м³; Q – расход воды в день взятия пробы, м³/с.

Минерализацией воды a называется степень концентрации химически растворенных веществ, определяется по весу сухого остатка в единице объема после выпаривания пробы по формуле $a = P_c \cdot 10^6/V$, где P_c – вес сухого остатка, г; V – объем взятой пробы, мл. При малом содержании в воде биогенных и органических веществ полученная таким образом минерализация может быть равна сумме главных ионов. В нашем примере (табл. 1.25) содержание биогенных веществ невелико, поэтому за величину минерализации a примем значение суммы главных ионов 128,8 мг/л. При большом числе отобранных проб за год может быть построен хронологический график: $a = f(T)$, с которого можно на каждый день по интерполяции определить значения минерализации a , а затем и ежедневный расход S в кг/с по формуле (1.93). При наличии устойчивой связи минерализации с расходом воды: $a = f(Q)$ значения среднесуточной минерализации можно получить по имеющимся ежедневным расходам воды. Существуют и другие подходы при подсчете ионного стока [Лучшева, 1972].

1.4. СВЕДЕНИЯ О ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ

Для учета количества стекающей воды основной характеристикой служат ее среднесуточные расходы в створе реки. Среднее значение расходов за год (365 дней) называют среднегодовым расходом воды. Расчет частот (вероятностей) появления максимальных расходов паводков и половодий, минимальных

расходов меженных периодов и других характеристик основывается на мгновенных, соответственно, наибольших и наименьших расходах воды в году. Набор среднегодовых, максимальных или минимальных расходов воды (чаще всего по одному значению в году) за длительный период называют *рядом наблюдений*, иногда *выборкой*. Ряды наблюдений годового, а также сезонного, максимального и минимального стока обрабатывают статистическими методами для получения расчетных гидрологических характеристик речного стока, которые используются для оценок водных ресурсов, экологических и инженерных задач. Среди этих характеристик наибольшее применение имеют: среднее многолетнее значение стока воды, коэффициент его вариации и асимметрии (чаще отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации), иногда коэффициент автокорреляции между стоком смежных лет. Определение расчетных гидрологических характеристик годового, сезонного, максимального и минимального стока в настоящее время выполняется в соответствии с требованиями официального документа «СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик» [Определение..., 2004], подготовленного Государственным гидрологическим институтом (Росгидромет).

1.4.1. Годовой сток воды

Годовым стоком, или средним многолетним стоком, называется среднее арифметическое его значение, полученное за многолетний период (обычно 50–60 лет), включающий несколько полных четных циклов колебаний водности реки при неизменных географических условиях и при одинаковом уровне хозяйственной деятельности на водосборе [Владимиров, 1990; Горошков, 1979].

Среднее многолетнее значение годового стока (в литературе также можно найти название *норма стока*) служит устойчивой характеристикой, определяющей общую водоносность рек и потенциальные водные ресурсы данного бассейна или района. Эта величина применяется при расчете других характеристик годового стока, например годовых величин различной обеспеченности (повторяемости), сезонных и месячных величин, и является обязательным параметром водного режима реки при проектировании инженерных сооружений и в экологических исследованиях.

Годовой сток воды может выражаться в виде: *среднего годового расхода воды* $\bar{Q}$, м³/с; *среднего годового объема стока* $\bar{q}$, м³ или км³; *среднего годового модуля стока* $\bar{q}(\bar{M})$, л/(с·км²); *среднего годового слоя* $\bar{h}$, мм.

Существуют различные приемы определения среднего многолетнего годового стока в зависимости от наличия гидрометрических наблюдений. Согласно СП 33-101-2003 [Определение..., 2004] – единому нормативному документу для гидрологических расчетов на территории России, продолжительность периода

наблюдений (ряд годовых значений стока) считается достаточной для установления расчетных значений годового стока и среднего годового стока заданных обеспеченностей, если рассматриваемый период репрезентативен и относительная средняя квадратическая погрешность среднемноголетней величины стока не превышает 10 %, а коэффициент изменчивости – 15 %.

Если погрешности превышают указанные пределы и период наблюдений нерепрезентативен, средний многолетний сток и коэффициент изменчивости (вариации) приводятся к более длительному периоду, например, с помощью рек-аналогов. Репрезентативность периода наблюдений n лет для расчета среднего многолетнего годового стока оценивается по рекам-аналогам с периодом наблюдений $N > 50$ лет путем построения и анализа разностных интегральных кривых годового стока. Репрезентативность в целом статистических параметров ($\bar{Q}$, C_v и C_s / C_v), вычисленных по ряду n лет, устанавливается путем сопоставления кривых обеспеченности годового стока, построенных по данным створа-аналога за период n и N лет. Средний многолетний годовой, а также сезонный, максимальный и минимальный сток могут быть определены: при наличии длительных гидрометрических наблюдений, недостаточности наблюдений и при отсутствии наблюдений в исследуемом створе реки.

Средний многолетний годовой сток представляет собой статистическую оценку – выборочное среднее – ряда годовых значений расходов воды в расчетном створе:

$$\bar{Q}_n = \frac{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_{n-1} + Q_n}{n}, \quad (1.94)$$

где $\bar{Q}_n$ – средний многолетний годовой сток, м³/с; $Q_1, Q_2, \dots, Q_{n-1}, Q_n$ – среднегодовые значения расходов воды за период N лет.

Выборочное среднее отличается от его истинного значения, установленного по генеральной совокупности наблюдений (при $N \rightarrow \infty$), за которую в практике обычно принимают ряд 80–100 лет (при условии его стационарности). При необходимости это отличие может быть оценено соответствующими статистическими методами [Определение..., 2004].

Часто исследователь располагает отрывочными наблюдениями за речным стоком, которые не позволяют рассчитать годовой сток с приемлемой погрешностью. В этом случае гидрологические руководства [Пособие..., 1984; Определение..., 2004] рекомендуют восстановление пропусков в ряду наблюдений и приведение его к многолетнему периоду по рекам-аналогам, имеющим продолжительный период наблюдений. Если погрешность годовых характеристик стока на уровне 15–20 % удовлетворит требованиям исследователя, то можно применить относительно более простые косвенные методы оценок при отсутствии данных наблюдений (см. далее), а имеющиеся фактические данные по стоку использовать в качестве дополнительной информации. В качестве реки-

аналога для расчетной реки или створа выбирается расположенная вблизи река, находящаяся в одинаковых с изучаемой рекой климатических и ландшафтных условиях. Внимание следует обращать на соотношение размеров водосборов, в особенности если исследуемая река малая ($< 10 \text{ км}^2$). Река-аналог не должна превышать ее площадью более чем в 3–5 раз. Для рек большего размера различие в площадях водосборов не должно быть более чем в 8–10 раз.

В руководстве [Определение..., 2004] отмечается, что объективными критериями правильности выбора аналога служит синхронность годовых колебаний стока в расчетном створе и реке (створе)-аналоге. Синхронность годовых колебаний годового стока в двух створах может быть проверена по суммарным кривым отклонения от середины *модульных коэффициентов* годового стока $k_i = Q_i / \bar{Q}_n$ и наличием достаточно тесной корреляционной связи стока за годы одновременных наблюдений.

Разработаны приемы восстановления пропусков и удлинение рядов [Пособие..., 1984; Определение..., 2004]. В проектно-изыскательских и научных организациях часто применяется соответствующее ПО для решения задач, возникающих при гидрологических расчетах (в том числе и для приведения коротких рядов к расчетному многолетнему периоду).

В самом простом случае, при наличии параллельных наблюдений в двух пунктах в течение не менее 10–15 лет и тесной связи между годовыми расходами, восстановление выполняется графически. На листе электронной таблицы Excel заполняются два столбца (расчетного створа и створа-аналога) средне-годовыми модулями стока $\bar{q} = \frac{\bar{Q}_n}{F}$, л/(с · км²) за одинаковые годы и строится

точечная диаграмма типа «XY» – график связи модулей стока. На поле точек выводится линейный тренд (реже нелинейный), уравнение регрессии и значение квадрата коэффициента корреляции (r^2). Связь можно использовать для восстановления данных, если отклонение точек от линии тренда на графике не превышает $\pm 15 \%$ и коэффициент корреляции $r \geq 0,8$. Все отклонения более $\pm 15 \%$ должны подкрепляться гидрологическим анализом [Определение..., 2004]. Значения недостающих среднегодовых модулей стока в ряду наблюдений снимаются с графика вручную или рассчитываются по уравнению регрессии на основании известных модулей стока створа-аналога.

На территории Российской Федерации насчитывается по данным РосНИИВХа [Михайлов, 2007] более 2,5 млн рек, из которых почти 95 % имеют длину менее 25 км, т.е. это малые реки. Гидрометрические наблюдения на реках страны производились по данным Росгидромета на 2009 г. [Обзор..., 2009] на 1877 гидрометеорологических станциях и 3104 постах (на которых часто измеряются только уровни воды), поэтому по многим рекам, в особенности малым, годовой и другие виды стока рассчитываются косвенными методами.

В основе косвенных методов лежат географические закономерности формирования речного стока, достаточно хорошо изученные НИИ Росгидромета, РАН и другими организациями. Результаты этих исследований обобщены Воскресенским [1962], Соколовским [1968], Клибашевым и Горошковым [1970], Владимировым [1976], Чеботаревым [1953], Федоровским [1985] и другими, а основные методики помещены в руководства по определению гидрологических характеристик [Указания..., 1972; Руководство..., 1973; Определение..., 2004]. В них рекомендуется определять годовой сток интерполяцией по карте изолиний среднего многолетнего стока и интерполяцией стока между опорными пунктами с установленными для них по данным наблюдений значениями. Средний многолетний годовой сток рек горных районов Дальнего Востока можно уточнить по районным зависимостям изменения модулей стока с высотой над уровнем моря [Гавриков, 1989, 2012].

Руководством [Определение..., 2004] для оценки среднего многолетнего годового стока рекомендована карта ГГИ изолиний модулей среднего годового стока рек СССР в масштабе 1 : 10 000 000 (Приложение 1 к Указаниям СН 435-72). Карты стока в более крупных масштабах для отдельных районов помещены в справочниках «Ресурсы поверхностных вод СССР». Годовой сток по карте изолиний определяется относительно центра водосбора неизученной реки, если он может быть найден в масштабе карты. Так, 1 см² карты ГГИ имеет площадь 10 000 км². Региональные карты строятся в более крупных масштабах – от 1 : 500 000 до 1 : 1 000 000. Здесь 1 см² карты составит соответственно 25 и 100 км². Таким образом, на карте ГГИ на площади 1 см² карты может быть найдена река длиной 120–150 км. На региональных картах длиной соответственно 6–7 и 12–15 км. Водосбор находится на карте, и сток определяется относительно его центра интерполяцией между изолиниями. При пересечении водосбора несколькими изолиниями (рис. 1.98) значение стока $\bar{q}$ определяется методом среднего взвешенного по формуле:

$$\bar{q} = \frac{q_1 f_1 + q_2 f_2 + \dots + q_n f_n}{F}, \quad (1.95)$$

где $q_1, q_2, \dots, q_n$ – среднее значение модуля стока между соседними изолиниями, пересекающими водосбор; $f_1, f_2, \dots, f_n$ – площади между изолиниями; F – общая площадь водосбора до расчетного створа.

Среднемноголетний расход воды (м³/с) рассчитывается по формуле:

$\bar{Q} = \frac{\bar{q} F}{1000}$, где $\bar{q}$ – рассчитанный по карте изолиний средний многолетний модуль стока.

К рассчитанному по карте стока значению применяются поправочные коэффициенты для малых рек, протекающих в засушливых и горных районах [Владимиров, 1990; Горошков, 1979].

Разработаны и другие приемы оценки среднего многолетнего годового стока (Определение..., 2004), в том числе для условий юга Дальнего Востока [Бобрик, Лисина, 2001; Гавриков, 1989, 2012; Федоровский, 1985].

В гидрологических расчетах кроме величины среднего многолетнего годового стока определяются также вероятности появления тех или иных расходов воды в будущем. Допущение стационарности процесса формирования годового стока, т.е. относительной устойчивости климатических изменений и неизменности антропогенной нагрузки, позволяет распространить на будущее те значения характеристик стока, которые установлены за период наблюдений в прошлом. Сток рек за отдельные годы весьма изменчив. В зависимости от климатической зоны в многоводные годы он может превышать величину среднего многолетнего годового стока в 2–3 раза, а в маловодные периоды быть ниже на такую же величину. Рассматривая хронологические графики хода атмосферных осадков, температуры воздуха, средних годовых расходов воды, нетрудно заметить их циклические колебания, которые принято называть скрытой периодичностью. Проведены многочисленные исследования с целью выявить закономерности колебаний климата [Шерстюков, 2011], непосредственно речного стока [Воскресенский, 1962; Природа..., 1976; Федоровский, 1985; Бобрик, Лисина, 2001; и др.] во времени и в пространстве. Установлены повторения величин стока со средней периодичностью, кратной 50–60 годам, на фоне которых наблюдаются мелкие циклы – 11 и 3–5 лет.

Если бы периоды колебания стока рек были бы более стабильны, то по данным наблюдений за прошлые годы можно было бы установить ход стока в будущем и достаточно точно прогнозировать время наступления и характеристики маловодий и паводков. Однако успехов здесь пока немного, и гидрологические расчеты основываются на определении таких характеристик стока, как обеспеченность или повторяемость в среднем 1 раз в N лет без привязки ко времени его появления. При этом в соответствии с нормативным документом СП 33-101-2003 обеспеченностью расхода (уровня) воды называется вероятность того, что рассматриваемое значение гидрологической характеристики может быть превышено среди совокупности всех возможных ее значений. Имеет хождение также инженерный термин «расчетная обеспеченность» – обеспеченность гидрологической характеристики, принимаемая при строительном проектировании для установления значения параметров

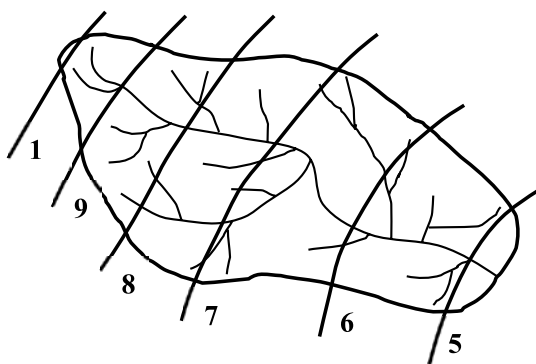


Рис. 1.98. Схема определения годового стока по карте изолиний

гидрологического режима, определяющих проектные решения [Определение..., 2004].

Определить расход воды заданной обеспеченности (вероятности ежегодного превышения) в будущем можно на основе известного закона распределения его вероятностей. Законов распределения (функций обеспеченностей), применяемых в гидрологии суши, да и в других естественных науках, немного, однако их параметры меняются в широких пределах как для характеристик явлений (например, годовой, сезонный, максимальный и минимальный сток), так и от места к месту. Поэтому главной задачей служит определение параметров закона распределения (аналитической функции распределения) ежегодных вероятностей превышения по данным наблюдений (эмпирическим данным). Распределение, построенное по данным наблюдений, принято называть *эмпирической кривой распределения* (обеспеченности). Существует классический прием построения таких распределений на основе оценки частот появления характеристик в интервалах, нашедший применение для длинных рядов (выборок). Этот прием широко применяется в биологических и других науках [Рокицкий, 1973]. В гидрологии к нему почти не обращаются, так как реальные ряды речного стока за редким исключением составляют несколько десятков лет [Дружинин, Сикан, 2001]. Метод построения эмпирической кривой распределения (обеспеченности) ежегодных вероятностей превышения по наблюдаемым данным в гидрологических расчетах начинается с ранжирования расходов воды, т.е. расположения их в убывающем порядке. Затем каждому члену ранжированного таким образом ряда назначается так называемая эмпирическая ежегодная вероятность превышения характеристики стока p (%) по одной из формул, выведенных из классической формулы вероятности $P = m/n$, где m – число случаев, благоприятствующих появлению события (расхода воды), n – общее число случаев (число членов ряда), при этом $n \rightarrow \infty$. Так как на практике приходится иметь дело с короткими рядами ($n \ll \infty$), применяется специальная формула эмпирической вероятности превышения (СП 33-101-2003):

$$p = \frac{m}{n+1} 100 \%, \quad (1.96)$$

где m – порядковый номер члена ряда, в котором значения рассматриваемой величины расположены в убывающем порядке; n – общее число членов ряда.

Известны и другие формулы расчета эмпирической вероятности, которые в той или иной мере учитывают особенности короткого ряда [Горошков, 1979; Виссмен, 1979; Владимиров, 1990; Дружинин, Сикан, 2001; Gordon et al., 2004].

Годовые характеристики стока, выраженные в расходах воды, но чаще в модульных коэффициентах (см. выше), наносятся на график со своими эмпирическими обеспеченностями [см. формулу (1.96)]. По полю точек проводится

плавная кривая, так называемая сглаженная эмпирическая кривая обеспеченности. Оптимальное проведение кривой – довольно сложная задача, и здесь не помогут пакеты программ научной графики для построения «трендов», так как в области расходов редкой повторяемости обычно всего несколько точек и из-за влияния остального большинства точек тренд занимает не оптимальное положение в этой области. На практике при значительном количестве точек и небольшом их отклонении от эмпирической кривой применяют следующий метод. Точки вручную наносят на специальный график с логарифмическим масштабом горизонтальной оси обеспеченностей (так называемая полулогарифмическая клетчатка с умеренной асимметричностью), на котором кривая спрямляется, что позволяет легче выполнять незначительную экстраполяцию (продолжение) кривой в область низких значений обеспеченности [Пособие..., 1984].

Аналитическое сглаживание и экстраполяция осуществляются путем подбора теоретической функции распределения, наиболее оптимально проходящей по полю точек (эмпирической кривой распределения), методам моментов, наибольшего правдоподобия или другими приемами. В руководствах по гидрологическим расчетам рекомендуются функции биномиального распределения (так называемая кривая Пирсона III типа) при $C_s / C_v \geq 2$ и трехпараметрического гамма-распределения Крицкого и Менкеля при любом соотношении $C_s / C_v \geq$ [Пособие..., 1984; Определение..., 2004]. Для подбора теоретических функций распределения достаточно определить три параметра: среднемноголетнюю величину стока $\bar{Q}_n$, коэффициент изменчивости (вариации) C_v и коэффициент асимметрии C_s . Коэффициент вариации C_v определяется по формуле:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_i - 1)^2}{n - 1}}, \quad (1.97)$$

где k_i – модульные коэффициенты среднего расхода каждого года; n – число лет наблюдений.

Коэффициент асимметрии C_s определяется по формуле:

$$C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (k_i - 1)^3}{(n - 1)(n - 2)C_v^3}. \quad (1.98)$$

Из-за большой ошибки расчета по формуле (1.98) на практике C_s часто определяется подбором, исходя из условия наилучшего совпадения теоретической кривой с эмпирическими точками, практикуется районирование соотношений C_s / C_v . Оценка точности определения параметров теоретической кривой выполняется стандартными статистическими методами, основой которых служит расчет средней квадратической ошибки коэффициента вариации σ_{C_v} ,

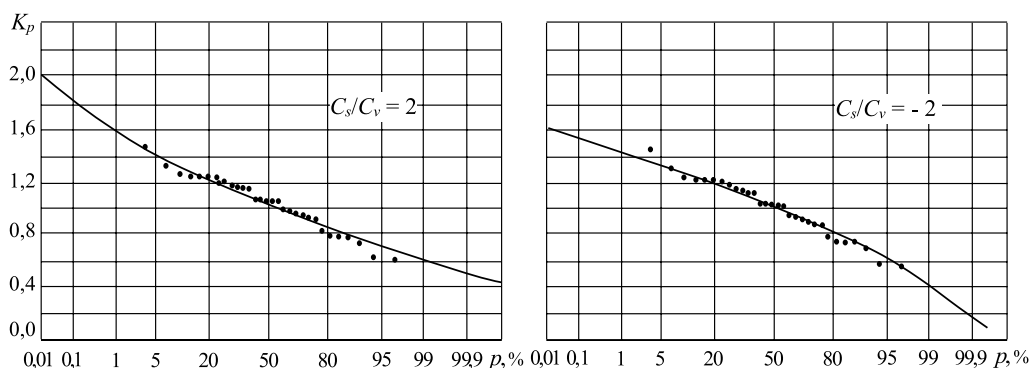


Рис. 1.99. Кривые обеспеченности Пирсона III типа на клетчатке с умеренной асимметричностью для одного и того же ряда ($n = 30$; $\bar{Q}_n = 98,5$; $C_v = 0,22$ при различных соотношениях C_s/C_v). Модификация рисунка из: [Дружинин, Сикан, 2001]

а на его основе средней квадратической ошибки средней многолетней величины ряда $\sigma_{\bar{Q}_n}$. На рис. 1.99 приведены кривые обеспеченности при различной асимметрии.

Здесь расходы выражены в модульных коэффициентах K_p . Положительная асимметрия наиболее типична для гидрологических характеристик, так как в ряду наблюдений присутствует преобладающее количество значений меньше среднего, т.е. 1, поэтому в соответствии с уравнением (1.98) $C_s > 0$. Образцы клетчаток и таблицы для расчета эмпирической обеспеченности для рядов различной длины приведены в приложении к справочнику [Пособие..., 1984].

Расход воды заданной обеспеченности p (%) определяется по формуле:

$$Q_p = K_p \bar{Q}_n, \quad (1.99)$$

где K_p – модульный коэффициент заданной обеспеченности p , %, снятый с принятой теоретической кривой обеспеченности; $\bar{Q}_n$ – среднемноголетний расход.

При отсутствии наблюдений в расчетном створе руководства по гидрологическим расчетам и региональные справочники «Ресурсы поверхностных вод» предлагают различные методы решения этой задачи. Среди них карты характеристик стока, коэффициента вариации и других параметров. Большое распространение в специальной литературе получили формулы для оценки C_v , использующие в качестве параметров площадь водосбора, величину годового стока, площадь озер, высоты водосбора над уровнем моря для горных рек, в том числе для условий юга Дальнего Востока [Бобрик, Лисина, 2001; Гавриков, 1989, 2012]. После определения основных параметров распределения $\bar{Q}_n$, C_v , соотношения C_s/C_v и автокорреляции между стоком смежных лет $r(1)$ расчетные обеспеченности устанавливаются обычным способом, как при наличии наблюдений.

1.4.2. Минимальный и максимальный сток

Основными характеристиками минимального стока в отечественной практике являются средний месячный или 30-дневный и средний суточный расходы воды, наблюдающиеся в меженные периоды [Пособие..., 1984]. В зарубежной практике проектирования используются также данные за 5, 7 или 10 сут [Виссмен и др., 1979]. Различают зимние и летние меженные периоды, и те, и другие связаны с резким сокращением притока воды с водосбора. Первые начинаются обычно с установлением отрицательных температур воздуха и ледостава на реках, вторые – после конца весеннего половодья. Минимальные расходы за зимнюю или летнюю межень по одному в каждом году выбираются из справочника «Ресурсы поверхностных вод СССР», а за последние после выхода справочника годы – из таблиц ежедневных расходов воды «Гидрологических ежегодников», если меженный период короткий или часто прерывается паводками, то используют средний расход за 30 сут с наименьшим стоком.

Расчет обеспеченных минимальных расходов воды сходен с аналогичной методикой для годового стока. Так как коэффициент вариации минимального стока в целом ниже, чем годового, то могут быть использованы более короткие ряды, главное, чтобы они включали самые маловодные годы. При высоких C_v может потребоваться удлинение рядов как и при расчете годового стока. Подбор теоретической кривой обеспеченности по аналогии с годовым стоком начинается с определения трех ее параметров: $\bar{Q}_n$, C_v , C_s/C_v , а также автокорреляции между стоком смежных лет $r(1)$ отдельно для зимней и летней межи. Средний многолетний минимальный расход определяется как среднее арифметическое из наименьших в году минимальных расходов отдельно для зимней и летней межи. Построение кривых обеспеченности минимального стока имеет особенность, которая заключается в возможном появлении в ряду нулевых значений из-за пересыхания и/или замерзания рек. В этом случае руководства рекомендуют применение графоаналитического метода Г.А. Алексеева или построение только эмпирической кривой. При отсутствии данных гидрометрических наблюдений на реке используются реки-аналоги, формулы и карты минимального стока и параметров кривых обеспеченностей в целом, как при расчетах средних многолетних величин и обеспеченностей годового стока.

Максимальные расходы воды формируются во время весеннего половодья и дождевых паводков. Весеннее половодье образуется из-за таяния снега и ледников в горах. Дождевые паводки связаны с выпадением жидких атмосферных осадков, часто паводки имеют снего-дождевое питание, когда дожди выпадают на спаде волны весеннего половодья. Считается, что в целом максимальные расходы дождевых паводков выше, чем весеннего половодья, подъем уровней воды в половодье более плавный, чем в паводок. Расчетная ежегодная

вероятность превышения (обеспеченность) максимальных расходов весенних половодий и дождевых паводков устанавливается нормативными документами. Для ориентирования в проблеме можно использовать рекомендации Горошкова [1979]. Так, для гидротехнических сооружений и сооружений мелиоративных систем в зависимости от их класса принимаются следующие расчетные вероятности превышения максимальных расходов воды:

Класс сооружения	I	II	III	IV	V
Обеспеченность, %	0,01	0,1	0,5	1	10

К I классу относятся напорные плотины ГЭС, на которых установленные максимальные расходы не могут быть превышены 1 раз в 10 000 лет. И это понятно, так как прорыв таких плотин грозит большими экономическими потерями и жизням проживающих в нижнем бьефе людей. К классу V относятся временные гидротехнические сооружения, обеспечивающие пропуск максимальных расходов 10 %-ной обеспеченности. Примерно такие же цифры относятся к железным и автомобильным дорогам и связанным с ними мостовым переходам. Так, вероятность превышения максимальных расходов мостовыми переходами и водопропускными отверстиями дорог I и II категорий (главные и вспомогательные железнодорожные пути, автомобильные трассы с твердым покрытием) составляет 1 %, а для наибольшего – 0,3 %, т.е. повторяемостью 1 раз в 100 и 300 лет соответственно. Мосты и водопропускные отверстия дорог ниже II категории (все остальные подъездные пути предприятий и все автомобильные дороги) должны пропускать максимальные расходы 2 %, а наибольший – 0,3 % обеспеченности, т.е. повторяемостью 1 раз в 50 и 300 лет соответственно.

Расчет максимальных расходов ведется отдельно для весеннего половодья, дождевых паводков и паводков смешанного происхождения. Затем из них выбирается наибольший расход или тот, который наиболее интересен для последующего использования. Длина рядов максимального стока должна составлять не менее 30–40 лет, для районов полупустынь и сухих степей с высокой изменчивостью стока рекомендуется использовать более длинные ряды. Вместе с тем наблюдения должны включать периоды с наибольшей водностью [Пособие..., 1984]. Максимальные расходы за половодье и/или дождевые паводки по одному в каждом году выбираются из справочника «Ресурсы поверхностных вод СССР», а за последние после выхода справочника годы – из таблиц ежедневных расходов воды «Гидрологических ежегодников».

Максимальные расходы воды заданных вероятностей ежегодного превышения определяются по теоретическим кривым, как и обеспеченные значения годовых расходов. Теоретические кривые подбираются по трем параметрам: $\bar{Q}_n$, C_v , соотношению C_s/C_v и автокорреляции между стоком смежных лет $r(1)$

отдельно для весеннего половодья и дождевых паводков. Эмпирические обеспеченности максимальных расходов рассчитываются по указанной выше формуле. При недостаточности данных гидрометрических наблюдений параметры кривых распределения гидрологической характеристики приводят, как и для годового стока, к многолетнему периоду по данным пунктов-аналогов с достаточными по продолжительности периодами наблюдений. При отсутствии данных гидрометрических наблюдений используют специальные формулы, карты характеристик минимального и максимального стока и региональные зависимости их параметров от физико-географических факторов [Пособие..., 1984; Определение..., 2004; Гавриков, 1989, 2012].

2. РЕЧНАЯ ГИДРОБИОЛОГИЯ

Основным объектом исследования гидробиологии, в том числе речной гидробиологии, является *экосистема*, которая может быть представлена как биоразнообразие видов плюс взаимосвязь потоков вещества, энергии и информации, последние рассматриваются как организующие и регулирующие [Bayers, Odum, 1993]. Динамическое взаимодействие потоков вещества, энергии и информации, обеспечивающие стабильность экосистемы во времени в конкретных условиях среды, относится к ее *функционированию* [Алимов и др., 2013].

Существование экосистемы, как системы открытой по энергии, возможно лишь при условии постоянного поступления извне энергии, способной совершать работу. Это может быть солнечная энергия, либо энергия, высвобождающаяся при химических реакциях, либо энергия, эквивалентная количеству поступающих в экосистему различного рода органических веществ, содержащихся во вносимых аллохтонных веществах (например, листовой опад) или загрязнениях. В экосистеме поддерживается целостность благодаря многообразным взаимосвязям, реализуемым через потоки энергии, вещества и информации. Число таких потоков, даже если ориентироваться на те из них, по которым имеется количественная информация, достаточно велико. Таким образом, экологические системы представляют собой крайне сложные природные объекты.

Один из трудных и спорных вопросов экологии – это определение границ экосистемы. Все, что находится за пределами экосистемы, называют *окружающей средой*. Экосистема и окружающая среда разделены границей, проведение которой носит условный характер. Наиболее простыми для выделения представляются экосистемы относительно небольших замкнутых водоемов, например прудов, озер; более сложными – экосистемы текучих вод, водохранилищ и крупных озер. Еще более сложны экосистемы морских и океанических водоемов, которые в данной работе не рассматриваются. Основное внимание в настоящем разделе будет уделено речным экосистемам, но многие из рассматриваемых проблем и полученных закономерностей справедливы как для экосистем всех внутренних водоемов, так и для морских экосистем.

При проведении полевых работ обычно возникает вопрос об отнесении или не отнесении к экосистемам отдельных водоемов/водотоков их водосборных

площадей. Ведь именно с водосбора поступает большая часть аллохтонных веществ в водные объекты. Если считать, что при анализе функционирования экосистем необходимо принимать во внимание потоки вещества и энергии с водосборной площади, то могут быть два подхода к решению вопроса о границах исследуемых экосистем.

В первом варианте количество веществ и эквивалентное количество энергии, которые поступают в водоем или водоток с площади водосбора, рассматриваются по отношению к их экосистемам как входные потоки вещества и энергии. При этом не проводится исследование и анализ процессов формирования вещественных, энергетических и информационных потоков на водосборных площадях водных объектов. В данном случае эти входные потоки рассматриваются как внешние факторы по отношению к конкретной экосистеме водоема или водотока.

Второй вариант определения границ исследуемых экосистем применяется, когда возникает необходимость учитывать процессы формирования потоков непосредственно на водосборной площади. В этих случаях в состав экосистемы входит не только водный объект, но и водосборная площадь, это приводит к тому, что очень часто границы водосборной площади с удовлетворительной точностью установить невозможно. Следовательно, границы экосистемы подвижны и могут изменяться в зависимости от задачи исследования. Важно понимать, что расширение границ экосистемы должно иметь разумные пределы и не выходить за те, в которых изучение самой экосистемы, как целого, возможно и имеет смысл.

Наиболее сложно обстоит дело с определением границ экосистемы по отношению к рекам, имеющим большую протяженность. Известно, что реки могут протекать через различные географические зоны. Кроме того, в любых реках условия в верхнем, среднем и нижнем течении совершенно разные. Все это не позволяет говорить об экосистеме реки как о некоем целом. Реально в реках существуют разные экосистемы. Поэтому речь может идти об особой надэкосистемной форме их организации – континууме речных экосистем или *реобиоме*, который представляет собой совокупность речных экосистем в речном континууме [Богатов, 1994, 1995]. В реобиоме по мере увеличения мощности потока происходит как смена видового состава, так и изменение структуры взаимосвязей между гидробионтами. Так, на верхних горных и полугорных участках рек основную роль играют бентосные сообщества, на средних и нижних участках – бентосные и планктонные. Огромное значение в функционировании речных экосистем имеет дрейф донных беспозвоночных и сезонные миграции рыб, в том числе их покатные миграции. На формирование структурных и функциональных характеристик реобиомов большое влияние оказывают физико-географические характеристики водосборных бассейнов (климат, широта местности, высота над уровнем моря, ландшафт, залесенность территории,

степень заболоченности, состав почв, подстилающие горные породы и т.п.), а также экосистемы пойменных водоемов.

В то же время по эколого-гидрологическим характеристикам все текущие воды в наиболее общем виде можно разделить на *креналь*, *ритраль* и *потамаль* [Illies, 1953; Illies, Botosaneanu, 1963]. К кренали относят область родникового ручья, а к ритрали – примыкающую к роднику часть водотока с каменистым или валунно-гравийно-галечным грунтом, высокой скоростью течения, насыщенной кислородом водой и летними среднемесячными температурами до 20°, к потамали – примыкающую к ритрали нижнюю часть водотока с песчаным, заиленным или илистым грунтом, сравнительно небольшой скоростью течения, летними среднемесячными температурами выше 20° и с частыми проявлениями дефицита кислорода.

Иногда в пределах кренали выделяют родник и родниковый ручей, называемые соответственно *зукреналью* и *гипокреналью* [Illies, Botosaneanu, 1963]. В свою очередь ритраль и потамаль могут разделять на части, каждая из которых соответствует участкам рек, к которым приурочено местообитание определенных групп рыб: *эпиритраль* (верхний форелевый участок), *метаритраль* (нижний форелевый участок), *гипоритраль* (хариусовый участок), *эпипотамаль* (усачевый участок), *метапотамаль* (лещевый участок) и *гипопотамаль* (ершово-камбальный участок). Такое разделение на участки хорошо согласуется с составом сообществ водорослей [Богатов, Никулина, 2009] и бентосных беспозвоночных [Леванидова, 1982]. Границы между ритралью и потамалью достаточно условны, зависят от климата региона и лежат над уровнем моря тем выше, чем ниже расположена географическая широта местности.

Следует отметить, что в полярных областях различия между населением ритрали и потамали невелики вследствие близких низких температур воды [Леванидова, 1982]. В тропической части земного шара речные системы также имеют свои особенности. Например, в бассейне Амазонки температура воды изменяется в пределах 27–30° с суточным колебанием менее 1° [Гайслер, 1988]. В настоящем разделе монографии основное внимание будет уделено населению и гидробиологическим закономерностям речных экосистем высоких и умеренных широт. С особенностями структуры и функционирования тропических речных экосистем можно ознакомиться в специальных сводках и монографиях [Dudgeon, 1999, 2007, 2008; и др.].

2.1. РЕЧНЫЕ ОРГАНИЗМЫ

К наиболее значимым группам водных организмов относят бактерий, водных растений, беспозвоночных и рыб. Кроме того, некоторые околотовные позвоночные (земноводные, птицы, млекопитающие) могут оказывать существенное воздействие на речные сообщества. Среди последних особое значение в преобразовании речного сообщества имеют речная выдра (*Lutra lutra*)

и бобры (*Castor fiber* и *C. canadensis*). Причем в малых реках речные бобры за счет строительства плотин (рис. 2.1) способны кардинально изменять не только водную среду обитания, но и околотоводные экосистемы [Завьялов и др., 2005; Дгебуадзе и др., 2012].

Речные организмы (реофилы), так же как и обитатели стоячих водоемов (стагнофилы), по местообитанию обычно делят на организмы планктона, нейстона, плейстона, нектона и бентоса. Организмы, живущие в толще воды и не связанные с дном, называют пелагическими организмами (планктон, нейстон, плейстон и нектон).

К планктону относят *обитателей толщи воды*, которые подразделяются на бактерио-, фито- и зоопланктон. В зависимости от образа жизни планктон подразделяют на организмы голопланктона, которые весь жизненный цикл проводят в форме планктона, и организмы меропланктона, которые существуют в виде планктона лишь часть жизни, например глохидии двустворчатых моллюсков, личинки рыб и пр. Под нейстоном понимают совокупность различных бактерий, водорослей и мелких беспозвоночных, живущих у поверхностной пленки воды на границе водной и воздушной сред. Выделяют *эпинейстон*, объединяющий организмы, живущие на поверхности воды, и *гипонейстон*, куда входят организмы, прикрепляющиеся к поверхностной пленке снизу либо обитающие в воде не глубже нескольких миллиметров от поверхности. Нейстонные пленки образуются, как правило, в стоячих водоемах, но могут появляться и на равнинных участках малых рек на сравнительно малой площади спокойной воды. К плейстону относят растительные или животные организмы, обитающие одновременно в водной и воздушной среде. Под термином нектон специалисты объединяют активно плавающих животных, преимущественно высших раков, а также рыб и других водных позвоночных, обитающих в толще воды и способных как противостоять силе течения, так и самостоятельно



Рис. 2.1. Бобровая плотина на безымянном притоке р. Кушалка (бассейн Верхней Волги).
Фото В. Богатова

перемещаться на значительные расстояния. К организмам бентоса относят обитателей грунта, которых обычно подразделяют на фито- и зообентос.

2.1.1. Бактерии

Исследование экологии водных микробиальных сообществ с привлечением новых методов исследования привело к созданию во второй половине XX в. концепции «микробиальной петли» [Azam et al., 1983; Бульон и др., 1999; Бульон, 2002; Weisse, 1991, 2003; Копылов, Косолапов, 2011; и др.]. В наиболее общем виде «микробиальная петля» представляет собой сложно организованную трофическую сеть, в которую вовлечены микроорганизмы и вирусы, различающиеся по размерам на несколько порядков величин, и объединенную в единую систему сложными трофическими и другими взаимодействиями [Алимов и др., 2013]. Микробиальное сообщество включает многообразные группы организмов, относящиеся к разным типам, царствам и даже надцарствам. Взаимоотношения между ними, их пространственная и временная динамика пока плохо изучены, особенно в условиях речных сообществ. В то же время большинством исследователей признано, что микробиальное сообщество играет важнейшую роль в функционировании водных экосистем, в частности в формировании потоков энергии и круговоротах биогенных элементов.

Современные исследования пресноводных бактерий сосредоточены в основном на обитателях озер. Что касается рек, то, например, из 25 крупнейших рек мира только в пяти детально изучался состав бактерий на генетическом уровне (последовательность генов бактерий, введенных в GenBank) – это р. Колумбия в Соединенных Штатах Америки [Crump et al., 1999], р. Янцзы в Китае [Sekiguchi et al., 2002], р. Маккензи в Канаде [Galand et al., 2008], р. Парана в Бразилии [Lemke et al., 2009] и р. Енисей в России [Колмакова, 2014; и др.].

Речной бактериопланктон (совокупность бактерий, обитающих в толще воды) относится к одной из наиболее разнообразных и динамичных природных систем. Незначительные изменения в водной среде приводят к существенной перестройке видового состава и структуры бактериальных сообществ. Именно поэтому состав и количественное развитие бактерий исследуются при оценке степени антропогенного загрязнения внутренних вод. Применению бактерий для оценки качества водной среды способствует их высокое видовое разнообразие. Например, в р. Енисей к настоящему времени было обнаружено 3022 операционных таксономических единицы («генетических вида») [Колмакова, 2014]. В бактериопланктоне этой реки выявлены три комплекса (сообщества), достоверно различающиеся по видовому составу и структуре, которые формируются, в частности, в результате биогеохимического влияния окружающего ландшафта: горной тайги (верхний участок реки), равнинной тайги (средний участок) и лесотундры и тундры (нижний участок). Причем доминирующие

таксоны каждого из комплексов специализируются в потреблении разных групп органических веществ [Колмакова, 2014; Kolmakova et al., 2014].

Изучение состояния гетеротрофного бактериопланктона в эстуарии Енисея в осенний период показало, что по мере удаления от распресненных вод к морским водам абсолютные значения всех микробиологических параметров снижались, в то время как доли бактерий с ненарушенной мембраной и активно функционирующих микроорганизмов в составе бактериопланктона возрастали [Мошарова и др., 2016]. Авторами исследования были обнаружены положительные корреляционные связи между величинами всех исследованных микробиологических параметров и содержанием в воде хлорофилла *a*, кремния, органического азота, кислорода, а также температурой воды, отрицательные корреляции – с соленостью воды и фосфатами. Сделано предположение, что пространственное распределение бактерий в исследованной акватории, по крайней мере в сентябре 2011 г., в первую очередь было связано с активностью гидродинамических процессов, а не с содержанием в воде биогенных веществ.

Было установлено, что изменения таксономического состава бактерий в реках зависят главным образом от основных сезонных событий, таких как весеннее половодье или зимнее питание рек подземными водами [Crump, Hobbie, 2005]. Исследование состава сообществ бактерий в шести крупнейших реках Субарктики – Оби, Лены, Енисея, Колымы, Юкона и Макензи, где доминировали обычные для пресных водоемов группы бактерий – *Bacteroidetes*, *Betaproteobacteria* и *Actinobacteria*, показали, что видовой и количественный состав их сообществ изменяется синхронно в течение каждого сезона и соотносится с сезонными изменениями гидрологического режима и химического состава воды, которые отмечаются во всех временных этапах: зима–весна, весна с паводковыми водами и лето–осень [Crump et al., 2009]. Полученная закономерность означает, что сезонная синхронность изменения климата в масштабе полушария задает вектор изменения и в микробном разнообразии рек. Поскольку сезонные изменения отмечены ежегодно во всех шести реках, можно говорить о долгосрочной и предсказуемой перестройке в составе крупных речных бактериопланктонных сообществ.

По мнению авторов исследования [Crump et al., 2009], ключевую роль в обнаруженных циклах смены таксономического состава бактериальных групп играет количество в воде растворенного органического вещества, ионов калия, натрия, кальция, хлора и магния. Такие сезонные изменения в химии воды связаны с особенностями режима питания рек. Например, зимой уровень содержания ионов калия, натрия, кальция, магния и хлора высок, в то время как растворенного органического вещества становится меньше. Это связано с тем, что зимой реки питаются в основном подземными водами. Весной картина совершенно меняется – количество растворенного органического вещества повышается, поскольку талые воды промывают водосбор и несут в реки частички

почвы, богатой органикой. Количество же ионов, наоборот, уменьшается. Летом количество органики вновь понижается, поскольку уменьшается объем поступающей воды. Становится ясно, что сезонность является общей чертой водных бактериальных сообществ. Таким образом, сообщества бактерий могут служить очень чутким индикатором изменений, происходящих в окружающей среде, например связанных с климатом.

Многочисленные исследования бактерий в незагрязненных малых реках показали жесткую зависимость степени развития бактериальных сообществ от наличия аллохтонного органического вещества (например, листового опада) или погибшей рыбы, особенно в период массового нереста лососевых рыб. На юге российского Дальнего Востока в низководный летний период при высоких температурах воды (обычно выше 26–28°) все чаще стал наблюдаться массовый отход неотнерестившихся лососей (рис. 2.2), в результате которого вода приобретала «трупный» запах.

В малых равнинных реках в течение летнего низководного периода в безветренную погоду на водной поверхности плесов может наблюдаться образование нейстонной бактериально-водорослевой пленки (рис. 2.3, 1), которая разрушается даже при легком ветре. Кроме того, в низководный период на речном грунте малых и средних рек часто формируются водорослево-бактериальные маты (толстые слоистые покровы на субстрате), которые при определенных условиях отрываются от грунта в виде «подушек» *метафитона** и сносятся по



Рис. 2.2. Массовая гибель лососей в период нерестового хода в р. Тумь (о-в Сахалин, июль 2001 г.). Фото В. Богатова



Рис. 2.3. 1 – бактериально-водорослевая пленка в р. Ивица (бассейн Верхней Волги, Тверская область); 2 – метафитон в низовьях одной из рек южных отрогов Восточно-Маньчжурских гор (май 2014 г.). Фото В. Богатова

течению. На равнинных реках зоны муссонного климата образование метафитона обычно происходит поздней весной при условии отсутствия выраженного весеннего половодья (рис. 2.3, 2).

Особая роль в пресноводных экосистемах, в том числе и речных, принадлежит цианобактериям (*Cyanobacteria*) – типу крупных бактерий, способных к фотосинтезу, сопровождающемуся выделением кислорода. Сравнительно крупные размеры клеток и сходство с водорослями были причиной их рассмотрения ранее в качестве синезеленых водорослей. Некоторые виды цианобактерий выделяют токсины. С массовым развитием цианобактерий связано цветение воды, которое вызывает заморы рыбы, а также отравления животных и людей.

** Метафитон – это отделившиеся от субстрата и всплывшие на поверхность фрагменты биообрастаний дна (эпибентос) и подводных поверхностей (перифитон). В состав метафитона обычно входят бактерии, водоросли, грибы и детрит.*

2.1.2. Водные растения

Исследованию систематики и экологии водных растений посвящены крупные сводки и монографии [Голлербах, Полянский, 1951; Забелина и др., 1951; Голлербах и др., 1953; Матвиенко, 1954; Киселев, 1954; Косинская, 1960; Дедусенко-Щеголева, Голлербах, 1962; Patrick, Reimer, 1966, 1975; Кондратьева, 1968; Асаул, 1975; Попова, Сафонова, 1976; Виноградова и др., 1980; Hindák, 1980; Паламарь-Мордвинцева, 1982, 1984; Wetzel, 1983; Round, 1984; Krammer, Lange-Bertalot, 1986, 1988, 1991a, 1991b; Мошкова, Голлербах, 1986; Ветрова, 1986; 1993; Дiatомовые водоросли..., 1988, 1992; Reichardt, 1995; Stevenson et al., 1996; Hartley et al., 1996; Lange-Bertalot, Metzeltin, 1996; Рундина, 1998; Komárek, Anagnostidis, 1999; Lange-Bertalot, Gencal, 1999; Krammer, 2000, 2002; Барина и др., 2006; и др.]. Это связано с тем, что растения играют важнейшую

роль в функционировании водных сообществ. В качестве основных продуцентов органических веществ водные растения прямо или косвенно служат источником пищи для всех водных животных. В ходе фотосинтеза растения не только образуют органические вещества, но и выделяют в окружающую среду кислород, который аэрирует воду и используется для дыхания рыбами и другими обитателями водоемов. Поглощая растворенные минеральные вещества, водные растения способствуют самоочищению бассейнов. Наконец, водные растения служат местообитанием и убежищем для многих водных беспозвоночных и рыб.

Обычно выделяют две основные группы водных растений – макрофиты и водоросли. К макрофитам относят растения сравнительно больших размеров (главным образом высшие водные растения), образующие три основные экологические группировки: с плавающими листьями, надводные и подводные макрофиты. Среди погруженных макрофитов в быстрых ручьях и реках на устойчивых субстратах часто развиваются мхи или бриофиты (*Bryophyta*). Особенно большого развития эти растения достигают на затененных лесным пологом биотопах, где иногда полностью покрывают скалы или крупные валуны (рис. 2.4). Здесь же могут развиваться некоторые виды корковых лишайников (рис. 2.5). Там, где течение чуть слабее, растут растения вроде водяного лютика, надежно прикрепляющегося к грунту обильной порослью придаточных



Рис. 2.4. Развитие мхов на камнях руч. Турова Падь (правый приток р. Комаровка).
Фото В. Богатова



Рис. 2.5. Корковые лишайники на камнях в р. Комаровка (камень поднят на поверхность).
Фото В. Богатова

корней (рис. 2.6). В медленно текущих водах широко распространен рдест пронзеннолистный (рис. 2.7). В тропических реках в прибрежной зоне рек и озер бурно разрастается плавающее на поверхности воды растение эйхорния, называемое также водяным гиацинтом, при этом крупные фрагменты этих зарослей постоянно переносятся речным потоком (рис. 2.8).

К водорослям (Algae) относят гетерогенную группу фотоавтотрофных одноклеточных, колониальных или многоклеточных организмов, в систематическом отношении представляющих собой совокупность нескольких отделов. Преобладающими водорослями в континентальных водоемах являются диатомовые (Bacillariophyta), зеленые (Chlorophyta) и желтозеленые (Xanthophyta) водоросли, прикрепленные или не прикрепленные к субстрату (рис. 2.9). Мелкие свободноплавающие водоросли входят в состав планктона и, развиваясь в больших количествах, вызывают «цветение» (окрашивание) воды. Бентосные водоросли прикрепляются ко дну водоема или к другим водорослям. В зависимости от места произрастания среди бентосных водорослей различают: *эпилиты*, растущие на поверхности твердого грунта (скалы, камни); *эпипелиты*, населяющие поверхность рыхлых грунтов (песок, ил); *эпифиты*, живущие на поверхности других растений; *эндолиты*, или *сверлящие водоросли*, внедряющиеся в известковый субстрат (скал, раковин моллюсков); *эндофиты* и *паразиты*, поселяющиеся в слоевищах других водорослей (эндофиты имеют нормальные хлоропласты, а паразиты таковых не имеют); *эндосимбионты*,



Рис. 2.6. Заросли водяного лютика (шелковника) Кауфмана *Batrachium kauffmannii* (Clerc) V. Kresz. в р. Бакбасу (правый приток Анюя, бассейн Нижнего Амура).
Фото В. Богатова



Рис. 2.7. Заросли рдеста пронзеннолистного *Potamogeton perfoliatus* L. в р. Ивица (бассейн Верхней Волги). Фото В. Богатова



Рис. 2.8. Снос речным потоком крупных фрагментов зарослей водяного гиацинта. Вьетнам, протоки дельты р. Меконг (апрель 2017 г.). Фото В. Богатова

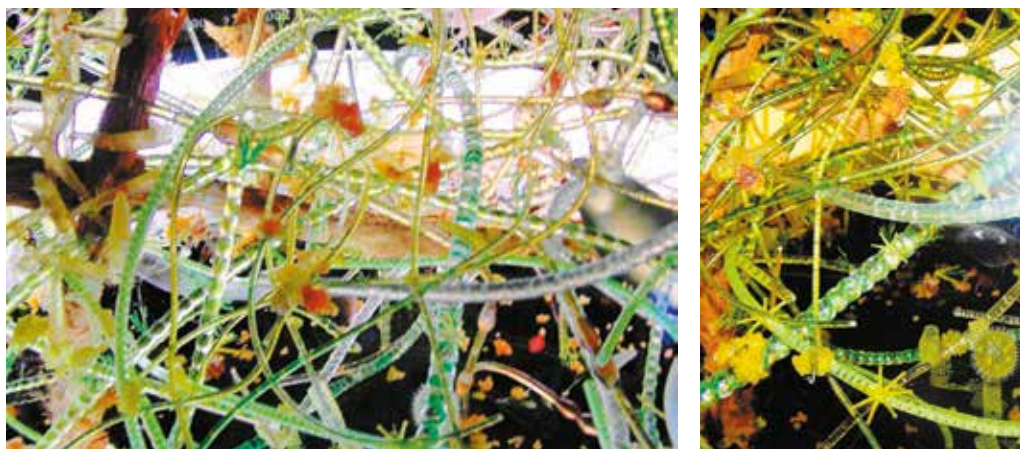


Рис. 2.9. Водоросли в пресноводном водоеме. Композиция в Музее природы Гранд-Рапидс (Grand Rapids, Michigan, USA). Фото В. Богатова

обитающие в клетках других организмов, беспозвоночных или водорослей; *эпизоиты*, обитающие на некоторых донных животных.

Часто водоросли, растущие на предметах, введенных в воду человеком (суда, плоты, сваи, буи), относят к *перифитону*. Выделение этой группы обосновывается тем, что входящие в ее состав организмы (водоросли и беспозвоночные) живут на предметах, движущихся или обтекаемых водой. Кроме того, эти организмы удалены от дна и, следовательно, находятся в условиях иного светового и температурного режимов, а также в других условиях поступления биогенных веществ.

Возможность произрастания бентосных водорослей в конкретных местобитаниях, в том числе в текучих водах, определяется как абиотическими, так и биотическими факторами. Среди последних существенную роль играет конкуренция с другими водорослями и присутствие животных, питающихся водорослями. К абиотическим факторам относятся интенсивность света и его продолжительность, скорость течения, температура, а также содержание в воде питательных веществ, кислорода и неорганических источников углерода. Например, увеличение притока питательных веществ в сочетании с доступом солнечного света вызывает интенсивное развитие водорослей в реке, протекающей по территории с вырубленным лесом. Бентосные водоросли, растущие в условиях движения воды, получают преимущества по сравнению с водорослями, растущими в малоподвижных водах. В частности, один и тот же уровень фотосинтеза может быть достигнут у них при меньшей освещенности. Движение воды предотвращает оседание на скалы и камни илистых частиц, которые мешают закреплению зачатков водорослей, а также смывает с поверхности грунта питающихся водорослями животных. Влияние течения на развитие бентосных водорослей особо ощутимо в ручьях и горных потоках.

В этих водных объектах выделяется группа бентосных водорослей, предпочитающих места с постоянным течением. При отсутствии движения воды и ее недостаточном обогащении биогенными веществами бентосные водоросли обычно угнетены.

В холодный период года в условиях стабилизации гидрологического режима отмечено массовое развитие диатомовых водорослей на каменистом грунте предгорных рек юга Дальнего Востока России. Максимальное развитие такие колонии достигают перед половодьем. На равнинных участках крупных рек в зимний период на нижней поверхности льда может развиваться сообщество криоперифитона. Например, на Нижнем Амуре водорослевый компонент криосообщества представлен центрической диатомеей *Aulacosira islandica* (O. Mull.) Simonen (= *Melosira islandica* O. Müller), а в среднем течении реки в его состав включается также зеленая водоросль *Ankistrodesmus* sp. [Юрьев, Лебедев, 1988]. Интенсивность развития этих водорослей связана с величиной подводной освещенности, которая, в свою очередь, определяется мощностью снежного покрова. В частности, оптимальные световые условия для развития *A. islandica*, составившие в дневное время 700–2000 лк, наблюдались в середине марта в местах с прозрачным льдом толщиной 140–150 см, покрытым 4–6 см плотного снега. Средние величины численности клеток на таких участках составляли 2600 млн кл. м⁻² с содержанием хлорофилла *a* около 240 мг · м⁻². Колонии *A. islandica* располагались во льду в микротрещинах преимущественно в виде вертикальных «лент», «пластин» либо в виде «нитей», «шнуров», представляющих собой пучки колоний от сотых долей до 1 мм в диаметре. На нижней поверхности льда подобные колонии образовывали свисающие в воду и омываемые течением «бороды». Клетки *Ankistrodesmus* sp. хаотически заполняли микротрещины.

В целом, на определенном участке русла реки можно выделить пять основных процессов, влияющих на динамику бентосных водорослей (рис. 2.10). Два из них – иммиграция клеток или групп клеток, обеспечивающая формирование начальных сообществ колонистов, и воспроизводство клеток водорослей – обеспечивают прирост водорослевых обрастаний. Текущая потеря водорослей происходит при их потреблении водными животными, элиминации и эмиграции клеток за счет дрейфа [Stevenson, 2010]. Перечисленные процессы определяют видовую структуру бентосных водорослевых сообществ в реках, численность и биомассу отдельных видов.

На равнинных участках крупных рек основное количество первичной продукции создается за счет планктонных водорослей. Интенсивность света, воздействующая на фитопланктон, определяется прозрачностью воды и глубиной потока. Так, исследованиями Сиротского было установлено, что в русле Нижнего Амура более 90 % планктонных водорослей испытывают

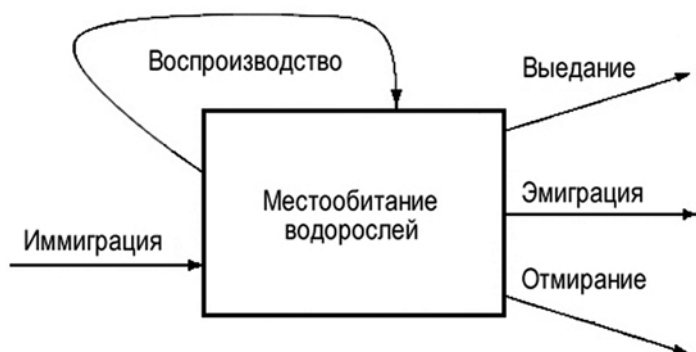


Рис. 2.10. Пять основных процессов, регулирующих биомассу и видовой состав водорослей в местообитаниях. Из: [Stevenson, 2010]

полное световое голодание, которое автор объяснял большими средними глубинами реки (свыше 10 м) и низкой прозрачностью воды (до 0,8 м) [Сиротский, 1991].

В верховьях рек в водном потоке отмечаются в основном бентосные водоросли, оторванные от субстрата течением. Если биомассу водорослей выражать через концентрацию хлорофилла a , то, например, в предгорных реках южной части российского Дальнего Востока эта величина мала и не превышает $3 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$. Максимальные концентрации хлорофилла a в Амуре (более $29 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$) чаще всего отмечается ниже г. Комсомольск-на-Амуре, а также в местах впадения в Амур проток, связывающих его с большими поймен-

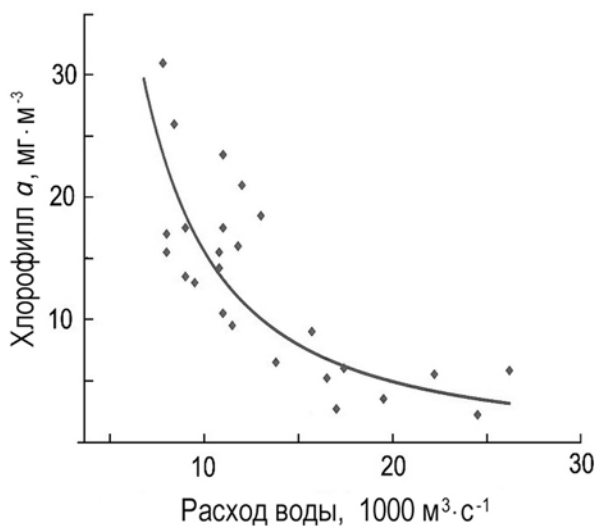


Рис. 2.11. Зависимость концентрации хлорофилла a ($\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$) от расхода воды ($1000 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$) в р. Амур у г. Комсомольск-на-Амуре. Из: [Bogatov et al., 1995]

ными озерами, являющимися основными поставщиками фитопланктона. В этих водоемах концентрация хлорофилла a может варьировать от 8 до $260 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$. При этом степень развития водорослей увеличивается по мере снижения уровня воды. В целом, в теплый период года концентрация хлорофилла a в планктоне Амура в значительной мере связана с расходом воды и на определенном участке реки представляет собой выраженную обратную зависимость (рис. 2.11).

2.1.3. Водные беспозвоночные

Беспозвоночные из ручьев и рек являются наиболее заметными и разнообразными водными животными [Жадин, 1940; Жадин, Гердт, 1961; Pennak, 1978; Лепнева, 1964, 1966; Fisher, 1965, 1966; Hynes, 1970; Панкратова, 1970, 1977, 1983; Кутикова, Старобогатов, 1977; Замбалева, 1981; Chekanovskaya, 1981; McCafferty, 1981; Леванидова, 1982; Resh, Rosenberg, 1984; Макаrenchенко, 1985; Леп, 1986, 1997; Балущкина, 1987; Тиунова, 1993, 2007а, б; Богатов, 1994; Allan, 1995, 2006; Merritt, Cummins, 1996; Giller, Malmqvist, 1998; Cushing, Allan, 2001; Voshell, 2002; Старобогатов и др., 2004; Лелей, 2006; Тесленко, 2007; Allan, Castillo, 2007; Morse, 2009; Miller et al., 2014; Лабай и др., 2015; Алексеев, Цалолихин, 2016; Morse et al., 2017; и мн. др.].

В области ритрали из беспозвоночных в основном распространены организмы зообентоса. Различают беспозвоночных, живущих в грунте и на грунте, подвижных, малоподвижных и неподвижных, внедрившихся частично в грунт или прикрепленных. Некоторые сетеплетущие ручейники, строя ловчие сети, склеивают между собой гальку и валуны, что повышает устойчивость грунта при прохождении паводков.

По способу питания представители зообентоса подразделяются на хищных, растительноядных (соскребателей перифитона – *perifiton grazers*), детритоядных и т.д. Среди детритоядных выделяют механических измельчителей листового опада (*large particulate shredders*) и сборщиков детрита (*collectors*), причем к последней группе часто относят как непосредственных сборщиков измельченных частиц детрита, так и бентосных фильтраторов (*benthic filter feeders*).

В горных и предгорных незагрязненных реках большим количественным развитием отличаются личиночные стадии насекомых. В некоторых малых реках они составляют от 60 до 90 % бентосных макробеспозвоночных, а их средняя за сезон биомасса, например в южных районах Дальнего Востока России, может достигать 20–30 г м⁻² [Леванидов, 1977; Кочарина и др., 1988; Богатов, 1994; Тиунова, 2001]. Наиболее важными группами здесь являются личинки из отрядов Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera и Diptera. Среди Diptera наиболее многочисленны представители Simuliidae, Chironomidae и Blepharoceridae, а на отдельных биотопах – и Limoniidae (рис. 2.12).

Среди других групп донных беспозвоночных ритрали выделяются простейшие (Protozoa), турбеллярии или ресничные черви (Turbellaria), олигохеты (Oligochaeta), пиявки (Hirudinea), высшие раки (Malacostraca) и моллюски (Mollusca). Простейшие (рис. 2.13, 1–3) представляют собой неоднородную группу микроскопических одноклеточных или колониальных эукариот, которые включают в себя все гетеротрофные и подвижные виды. В речных экосистемах простейшие обитают там, где ограничена скорость воды, особенно в ин-



Рис. 2.12. Личинки из отрядов Ephemeroptera (1 – *Cinigmula sceporensis*, 2 – *Drunella acula*, 3 – *Cincticostella levanidovae*, 4 – *Ephemera strigata*), Plecoptera (5 – *Stavsolus manchuricus*, 6 – *Kamimuria exilis*, 7 – *K. lyubaretsi*, 8 – *Pteronarcys sachalina*), Trichoptera (9 – *Stenopsyche marmorata*, 10 – *Hydropsyche* sp., 11 – *Apatania* sp., 12 – *Limnephilidae*) и Diptera (13 – *Simuliidae*, 14 – *Orthoclaadiinae* (*Pagastia orientalis*), 15 – *Blepharoceriidae*, 16 – *Limoniidae*).

Фото В. Богатова

терстициальных местообитаниях, в сочетании с растениями или скоплением органического материала. Олигохеты (рис. 2.13, 4) являются одним из фоновых обитателей песчаного наполнителя гравийно-галечного грунта. Среди турбеллярий на быстринах наибольшего развития получают планарии (рис. 2.13, 5),

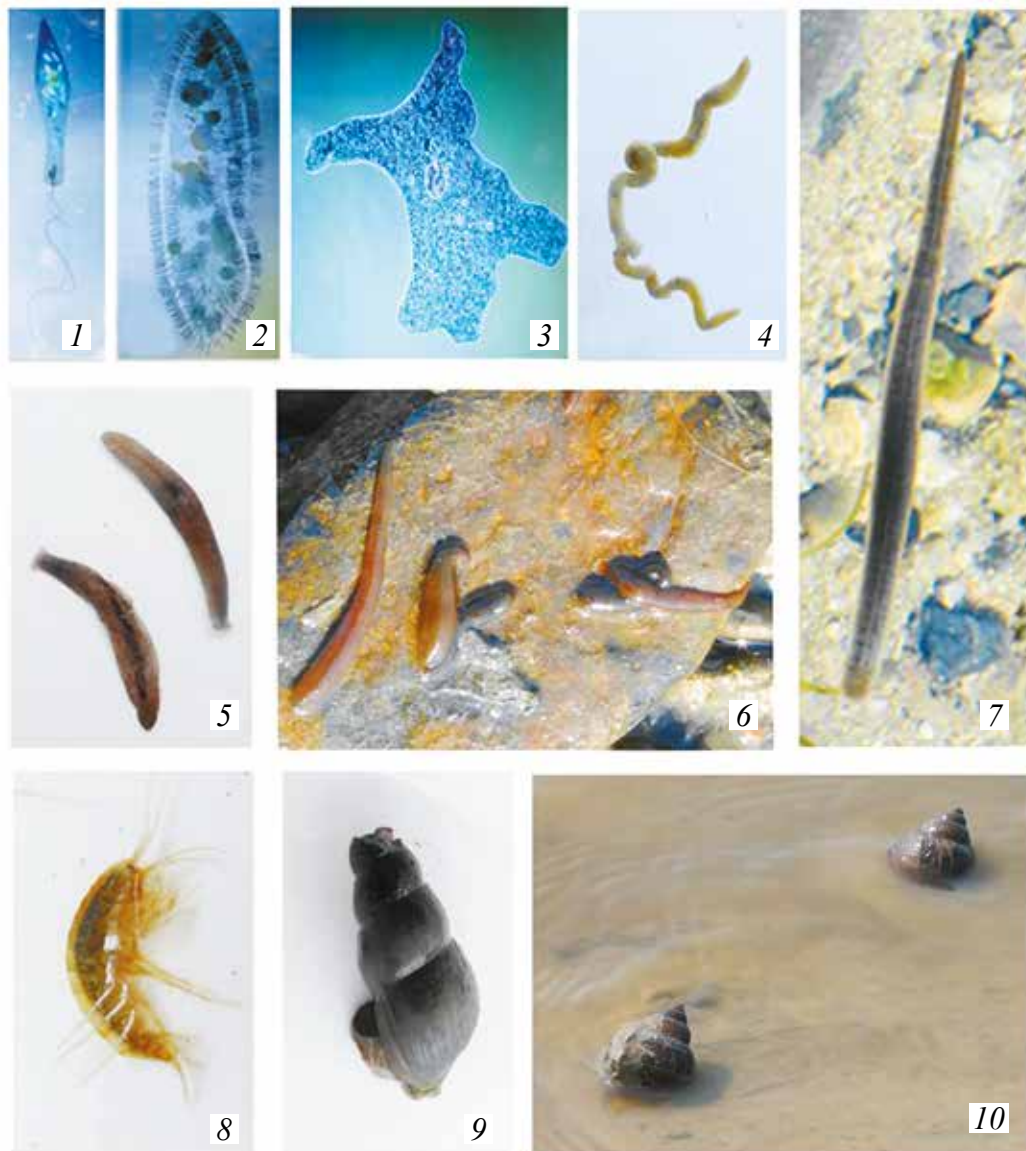


Рис. 2.13. Некоторые представители простейших (1 – эвглена, 2 – инфузория-туфелька, 3 – амеба), олигохет (4), планарий (5), пиявок (6, 7), амфипод (8 – *Gammarus* sp.) и гребнежаберных моллюсков (9 – *Parajuga subtegulata*, 10 – *Cipangopaludina ussuriensis*).

Фото В. Богатова

которые в холодноводных ручьях и речках населяют крупные валуны. В отдельных реках высокого количественного развития получают пиявки (рис. 2.13, 6, 7) и высшие раки из отряда Amphipoda (рис. 2.13, 8). В частности, амфиподы в некоторых реках российского Дальнего Востока способны достигать до 95–98 % численности и биомассы всего бентоса, в то время как в соседних речных бассейнах гаммариды могут не развиваться вовсе. Например, речные экосистемы Шантарских островов, имеющие горный и предгорный характер, по составу донных беспозвоночных можно разделить на 2 группы: реки, состав донной фауны которых более чем на 80–90 % состоит из амфипод (например, на о-ве Большой Шантар это р. Большой Анаур, протока, вытекающая из оз. Большое; левобережная протока, соединяющая опресненное озеро с оз. Большое; на о-ве Феклистова – река, впадающая в бухту Россета и др.), и реки, состав донной фауны которых в основном состоит из личинок водных насекомых (главным образом личинок поденок и ручейников) при практически полном отсутствии амфипод (например, на о-ве Большой Шантар это реки Якшина, Оленья, правый безымянный приток оз. Большое; на о-ве Малый Шантар – речка, впадающая в бухту южнее мыса Горбатый и т.п.). Аналогичную ситуацию мы наблюдали на реках, впадающих в зал. Шелихова (Охотское море). Причина такого различия не вполне ясна. В то же время в бассейне р. Комаровка (Приморский край) абсолютное преобладание амфипод (до 98 % биомассы) нами было обнаружено в ручье II порядка Турова Падь (правый приток Комаровки), ложе которого выложено пористыми породами, что резко снижает колебания уровня воды в периоды паводков. Стабильный гидрологический режим потока на фоне изобилия аллохтонной органики (река протекает в зоне хвойно-широколиственного леса), по-видимому, определяет наиболее благоприятные условия для развития ракообразных (рис. 2.14).

Из моллюсков в реках могут быть обильны представители гребнежаберных брюхоногих моллюсков (*Pectinibranchia*) (см. рис. 2.13, 9, 10). Кроме того, в некоторых лососевых реках большого количественного развития достигают крупные двустворчатые моллюски (*Bivalvia*). Например, в северо-западной Европе, на Дальнем Востоке России и в Северной Америке большой биомассы достигают двустворки из семейства жемчужовые *Magaritiferae* (рис. 2.15, 1–3), которые подчас образуют чрезвычайно плотные поселения. Эти двустворки предпочитают чистые реки с выходом подземных вод. Они относятся к одним из самых долгоживущих речных беспозвоночных, причем возраст отдельных особей может превышать 100 лет.

В европейских равнинных реках распространены крупные униониды из родов *Unio* (рис. 2.15, 4–6), *Colletopterum* (рис. 2.15, 7) и *Pseudanodonta* (рис. 2.15, 8), причем биомасса некоторых двустворчатых моллюсков из рода *Unio* может достигать 80 кг и более на 1 м² площади грунта (рис. 2.16) [Protasov et al., 2015]. В бассейне Амура распространены униониды из родов *Middendorffinaia*,



Рис. 2.14. Руч. Турова Падь. Фото В. Богатова

Nodularia, *Lanceolaria*, *Cristaria* и *Sinanodonta* (см. рис. 2.15, 9–13), на стрежне реки развиваются пресноводные *Corbicula*. На восточном склоне Сихотэ-Алиня, о-ве Сахалин и Южных Курильских островах обычны двустворки из рода *Kunashiria*, а в речных системах Сибири – крупные беззубки из рода *Colletopterum* [Старобогатов и др., 2004]. В последнее столетие в бассейнах рек Европы и Передней Азии широкое распространение получили двустворчатые моллюски *Dreissena*. Эти моллюски прикрепляются к твердому субстрату нитями биссуса, при этом они способны образовывать обширные многоярусные скопления – друзы (рис. 2.17).

На равнинных участках малых и средних рек, а также в проточных канавах в затишную погоду нередко можно встретить представителей нейстона. Из беспозвоночных в состав нейстона могут входить жуки-вертячки, клопы-водомерки, некоторые мелкие легочные моллюски, личинки комаров и другие организмы (рис. 2.18).

Для речного планктона, в отличие от зообентоса, характерно гетерогенное происхождение, так как он образуется за счет как автохтонных, так и аллохтонных элементов. На горных участках рек зоопланктон практически отсутствует, а видовое богатство речного планктона в равнинных реках обычно возрастает от истоков к устью. На участках потамали среди планктонных организмов доминируют простейшие, коловратки, дафнии, циклопы, личинки двустворчатых моллюсков, насекомых, многих мелких организмов бентоса. Например, на Нижнем Амуре среди планктонных беспозвоночных обычны кладоцеры

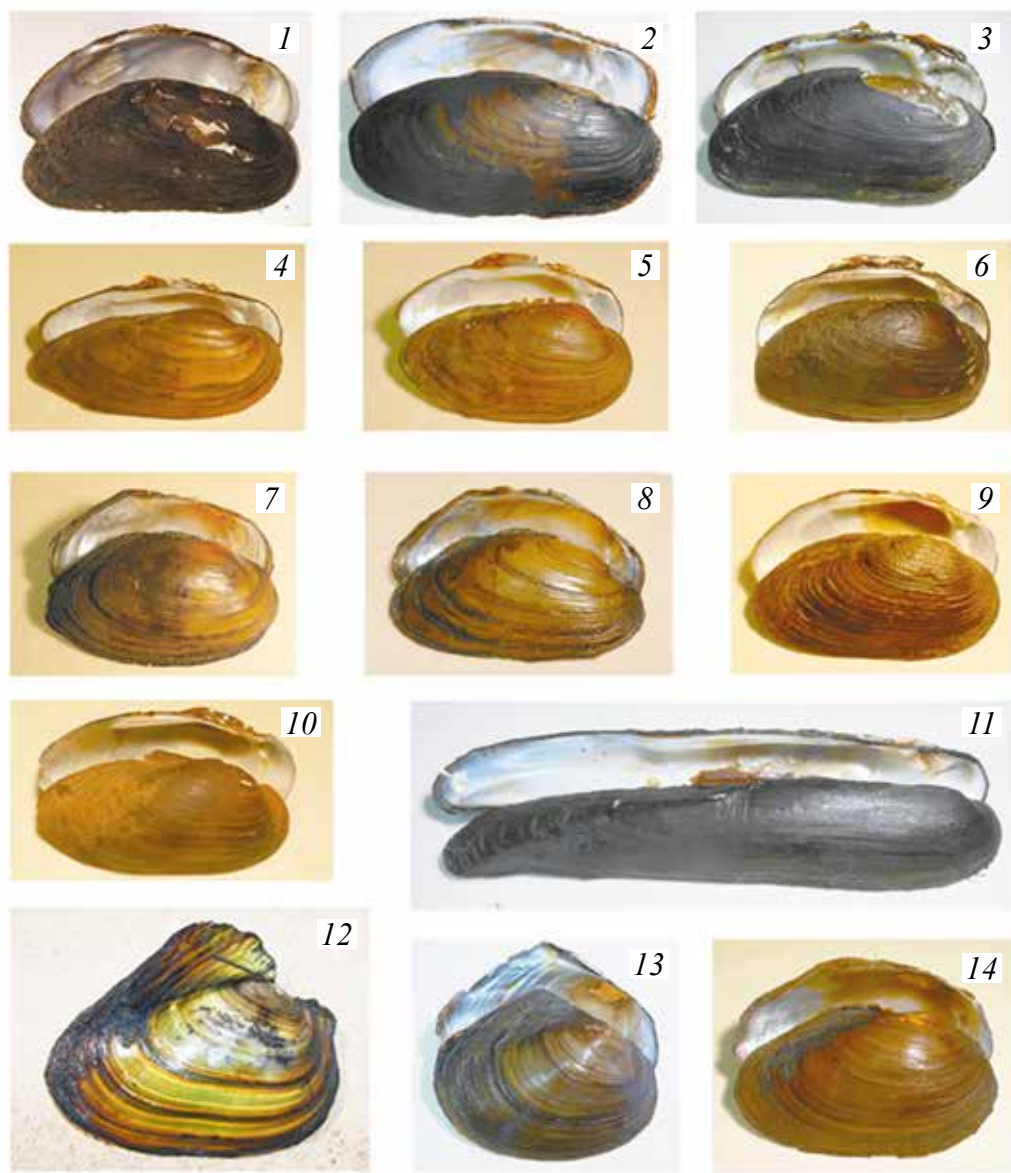


Рис. 2.15. Крупные двустворчатые моллюски: 1 – *Margaritifera margaritifera* (L.); 2 – *Dahurinaia dahurica* (Midd.); 3 – *Kurilinaia kurilensis* (Zatr. et Bogat.); 4 – *Unio pictorum* (L.); 5 – *Unio tumidus* Philipsson in Retzius; 6 – *Unio crassus* Philipsson in Retzius; 7 – *Colletopterum piscinale* (Nilsson); 8 – *Pseudanodonta complanata* (Rossm.); 9 – *Middendorffinaia mongolica* (Midd.); 10 – *Nodularia amurensis* (Mousson); 11 – *Lanceolaria maacki* Moskv.; 12 – *Cristaria herculea* (Midd.); 13 – *Sinanodonta likharevi* Moskv.; 14 – *Kunashiria japonica* (Clessin).

Фото В. Бозатова



Рис. 2.16. Массовое поселение двустворчатых моллюсков в р. Гнилой Рог (бассейн р. Припять, Украина). Фото А. Протасова и А. Силаевой (публикуется с разрешения авторов)

(Cladocera), каланиды (Copepoda) и коловратки (Rotatoria). Максимального таксономического и количественного развития организмы зоопланктона достигают в летнюю межень. В этот период в составе зоопланктона Амура отмечено более 20 видов ракообразных, достигающих на отдельных участках до 1–3 тыс. экз. м^{-3} и 0,01 г м^{-3} . В зимний период амурский зоопланктон очень



Рис. 2.17. Друза из дрейссен *Dreissena polymorpha* (Pallas) на раковине двустворчатого моллюска. Оз. Дуглас (Douglas Lake), Мичиган, США. Фото В. Богатова

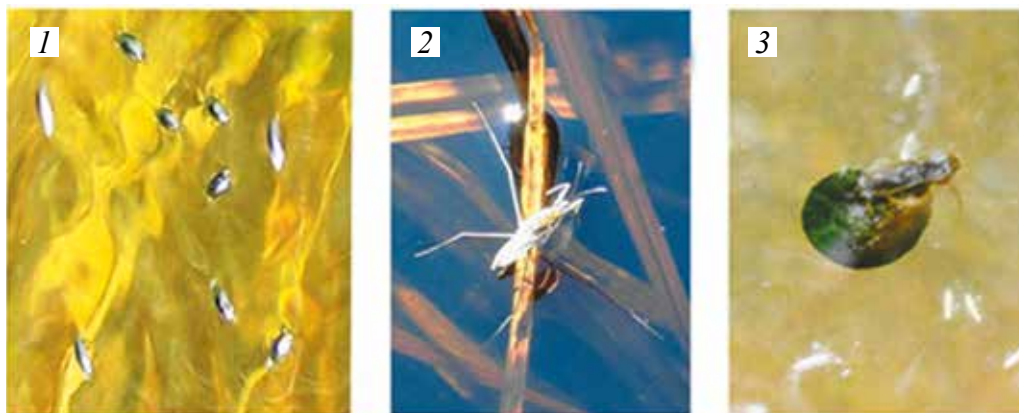


Рис. 2.18. Организмы нейстона: 1 – жуки-вертячки; 2 – клоп-водомерка; 3 – планорбида *Polypylis semiglobosa*. Фото В. Богатова

беден и представлен 2–3 видами с численностью и биомассой, не превышающей 150–600 экз. м^{-3} и 0,002–0,004 г м^{-3} соответственно [Сафонов, 1979].

2.1.4. Рыбы

Рыбы (Pisces) представляют собой обширную и разнообразную группу челюстноротых, для которых характерно жаберное дыхание на всех этапах постэмбрионального развития [Берг, 1948, 1949а, б; Никольский, 1963; Allen, 1969; Зенкевич, 1971; Жуков, 1988; Черешнев, 1996; Решетников, 2003; Богуцкая, Насека, 2004; Мэйтленд и др., 2009; Moyle, Cech, 1996, 2000, 2004; Gido, Jackson, 2010; Макеева и др., 2011; Eschmeyer et al., 2016; и мн. др.]. Они играют важнейшую роль в большинстве водных экосистем как составляющая пищевых сетей [Никольский, 1963]. Рыбам присущ широкий спектр пищевых объектов и способов питания. В целом, все рыбы могут быть разделены на растительноядных, хищников, детритофагов и всеядных. Многие виды рыб изменяют тип питания на протяжении жизни: например, в молодом возрасте питаются планктоном, а позже – крупными беспозвоночными или рыбами.

Рыбы обитают как в соленых, так и в пресных водоемах, от глубоких океанических впадин до горных ручьев. Рыбы, встречающиеся в реках, делятся на жилых, проходных и полупроходных. Первые живут только в реках, вторые обитают в море, а в реки идут лишь для нереста. Полупроходные рыбы живут в море, а нерестятся в низовьях рек.

Наименьшее число видов рыб живет в пресных водах Крайнего Севера. Например, в пресных водоемах Мурманской области отмечается около 20 видов рыб, часть из которых относится к полупроходным [Красная книга ..., 2003]. Среди северных ихтиологических районов Дальнего Востока России наиболее богатой ихтиофауной, состоящей из 37 видов рыб, из которых 13 – типично

пресноводные, отличаются бассейны рек Колымо-Индиго-Ирской низменности – Индигирка, Алазея, Чуко-чья, Колыма [Черешнев, 1998]. В крупнейшем на Северо-Востоке России Анадырском бассейне отмечен 31 вид пресноводных рыбообразных и рыб [Черешнев и др., 2001]. В более южных, аналогичных по площади бассейнах рек, число видов рыб обычно увеличивается. Например, ихтиофауна о-ва Сахалин насчитывает 62 вида и подвида [Лабай и др., 2015].

В Европе среди крупных рек наиболее богатой ихтиофауной обладает р. Волга. В ее бассейне обитает чуть более 120 видов и подвидов рыб. Среди других крупных речных бассейнов Российской Федерации наибольшее число видов рыб отмечено в бассейне Амура и примыкающих к нему с юга и юго-востока бассейнах рек Приморского края – более 150 видов рыб, что составляет одну треть всех пресноводных видов рыб в России [Bogutskaya et al., 2008; Бушуев, Барабанщиков, 2012]. Среди рек земного шара максимальное число видов рыб отмечено в бассейне р. Амазонка – более 3000 видов [Moyle, Cech, 1996].

В целом видовой состав рыб (N_{fish}) в речных системах почти всех континентов Земли оказался связан с площадью бассейнов отдельных рек (S_{bas}) строгой зависимостью (рис. 2.19). В частности, Алимов [2000] по данным Аллана [Allan, 1995] такую зависимость выразил уравнением:

$$N_{fish} = 0,134 S_{bas}^{0,544}, R^2 = 0,967.$$

Показатель степени в уравнении Алимова заметно превышает аналогичный показатель, рассчитанный нами для водорослевых сообществ [Богатов, Никулина, 2010], что указывает на более равномерное увеличение видового разнообразия рыб по мере увеличения площади бассейна. Это положение

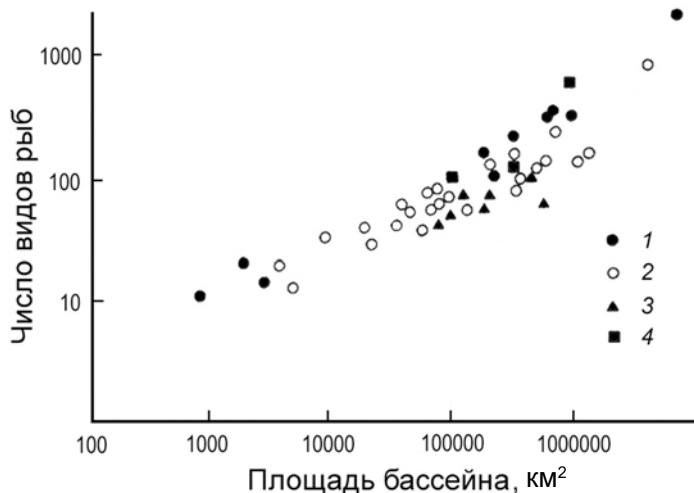


Рис. 2.19. Зависимость числа видов рыб в реках от площади их бассейна: 1 – Южная Америка; 2 – Африка; 3 – Европа; 4 – Азия. Из: [Allan, 1995]

подтверждается и отдельными частными наблюдениями. Например, для 48 рек штата Орегон (США) было установлено, что соответствие между региональными факторами и составом отдельных компонентов биоты в ихтиоценозе оказалось более строгим, чем в перифитоне [Whittier et al., 1988].

Несомненно, видовое богатство водных растений и животных определяется особенностями местообитаний, причем видовое разнообразие ихтиоценозов в основном обуславливается как параметрами ландшафтов [Жаков, 1984], так и некоторыми гидрологическими и гидрохимическими факторами [Никольский, 1963]. В то же время следует отметить, что отдельные виды жилых рыб встречаются по всей длине реки, а другие обитают на определенных ее участках, причем число видов рыб обычно увеличивается от верховьев к устью либо за счет добавления новых видов, либо за счет замены одних на другие.

Что касается бассейна Волги, то в зоне ритрали из рыб, приспособленных к быстрому течению и повышенному содержанию растворенного в воде кислорода, наиболее обычны голавль *Leuciscus cephalus* (L.), подуст *Chondrostoma nasus* (L.), елец *Leuciscus leuciscus* (L.), пескарь *Gobio gobio* (L.), жерех *Aspius aspius* (Linnaeus), налим *Lota lota* (L.), судак *Sander lucioperca* (L.), язь *Leuciscus idus* (L.), ручьевая форель *Salmo trutta fario* L. и др. В зоне потамали из жилых рыб наиболее характерны стерлядь *Acipenser ruthenus* L., лещ *Abramis brama* L., густера *Blicca bjoerkna* (L.), щука *Esox lucius* L., судак, налим, окунь *Perca fluviatilis* L. Среди проходных рыб наиболее значимы белуга *Huso huso* (L.), осетр *Acipenser sturio* L., севрюга *Acipenser stellatus* Pallas, семга *Salmo salar* L., из полупроходных – вобла *Rutilus caspicus* Yakovlev, тарань *Rutilus heckelii* Nordmann, усач *Barbus barbus* L. и др.

В горных и предгорных потоках бассейна Амура наиболее распространены хариусы *Thymallus* spp., таймень *Hucho taimen* (Pallas) и ленки *Brachymystax lenok* (Pallas) и *B. tumensis*. В низовьях Амура обитают ценные осетро-вые – амурский осетр *Acipenser schrenckii* Brandt и калуга *Huso dauricus* Georgi. В пойменных озерах и протоках отмечены золотистый карп *Carassius gibelio* (Bloch), амурская щука *Esox reichertii* Dyb., сазан *Cyprinus rubrofasciatus* La Cèpede, серебряный карась *Hypophthalmichthys molitrix* и амурский сом *Silurus asotus* (L.), а также очень редкие виды – окунь-Ауха *Siniperca chuatsi* Basilewski, черный Амур *Mylopharyngodon piceus* Richardson и змееголов *Channa argus* Cantor. Важно отметить, что характерной особенностью ихтиофауны потамали Амура является наличие большого количества мелких бентосоядных рыб, а также рыб, которые по типу питания не находят себе аналогов в водах Европы и Сибири: толстолобика *Hypophthalmichthys molitrix* Val., питающегося фитопланктоном, фильтруя его специализированными жаберными тычинками на жаберных дугах, и белого амура *Ctenopharyngodon idella* Val., питающегося высшей растительностью.

Для многих видов жилых рыб характерны масштабные миграции, позволяющие им использовать для нагула, нереста или проведения зимовки различные участки речного бассейна, часто расположенные за многие десятки и сотни километров друг от друга [Павлов, Скоробогатов, 2014]. Например, для большинства видов амурских рыб русло Амура, его притоки и пойменные озера представляют собой единый экологический комплекс. В частности, многие фитофильные рыбы Амура на лето заходят в крупные пойменные озера для размножения и нагула. Зимовка же их из-за промерзания озер возможна только в русле Амура. На зиму в основное русло Амура также заходят обитатели более мелких горных и предгорных притоков [Никольский, 1963].

Наиболее далекие миграции из амурских рыб совершают проходные лососи (рис. 2.20). Крупная осенняя кета *Oncorhynchus keta* inf. *autumnalis* Berg. в большом количестве поднимается по Амуру выше Хабаровска, более



Рис. 2.20. Нерестовый ход тихоокеанских лососей: 1 – о-в Сахалин, р. Той; 2 – экспозиция Музея естествознания (Пхеньян, КНДР). Фото В. Богатова

мелкая летняя кета *Oncorhynchus keta* typ. обычно не идет выше г. Комсомольск-на-Амуре. У горбуши *O. gorbuscha* (Walb.) основные нерестовые реки располагаются в бассейне лимана Амура, много горбуши идет в крупный приток Амура – р. Аргунь. Во время миграции вверх по реке амурские лососи прекращают питание. Достигнув своих нерестилищ и отложив икру, все они погибают. Скат молоди лососей приурочен к темному времени суток и совпадает с активным дрейфом речного бентоса [Леванидова, Леванидов, 1962]. Большая часть скатившейся молоди кеты, выйдя из лимана Амура, погибает с севера о-ов Сахалин и вдоль его восточного берега движется на юг к берегам Японии. Часть молоди горбуши после ската уходит на север в Охотское море, другая часть через прол. Невельского идет для нагула в Японское море [Никольский, 1963; Коновалов, 1980]. Осенью в Амур из моря также входит минога *Lampetra japonica* (Mart.), а весной – корюшка-зубатка *Osmerus eperianus dentex* Steind.

Рыбы, обитающие в реках, очень отличаются друг от друга по своим размерам и образу жизни. Самой крупной пресноводной рыбой считают обитающую в бассейне Волги и Каспийском море белугу (рис. 2.21), вес наиболее крупных пойманных экземпляров этого вида достигал полутора тонн (<http://ykrayazemli.livejournal.com/28245.html>). В то же время самая мелкая рыба Волги – зернистая пугловка *Benthophilus granulatus* Kessler – имеет длину всего 2,5 см и по своему внешнему виду напоминает головастика (рис. 2.22, 1). Самой же мелкой пресноводной рыбой считают карликовую пандаку *Pandaka pygmaea*



Рис. 2.21. Белуга, пойманная под Казанью в 1921 г., весом в 965 кг. Из белуги было извлечено 190 кг черной икры. Фото из: http://mir-i-mi.ucoz.ru/photo/istorija/momenty_istorii/beluga_1921_god/20-0-64

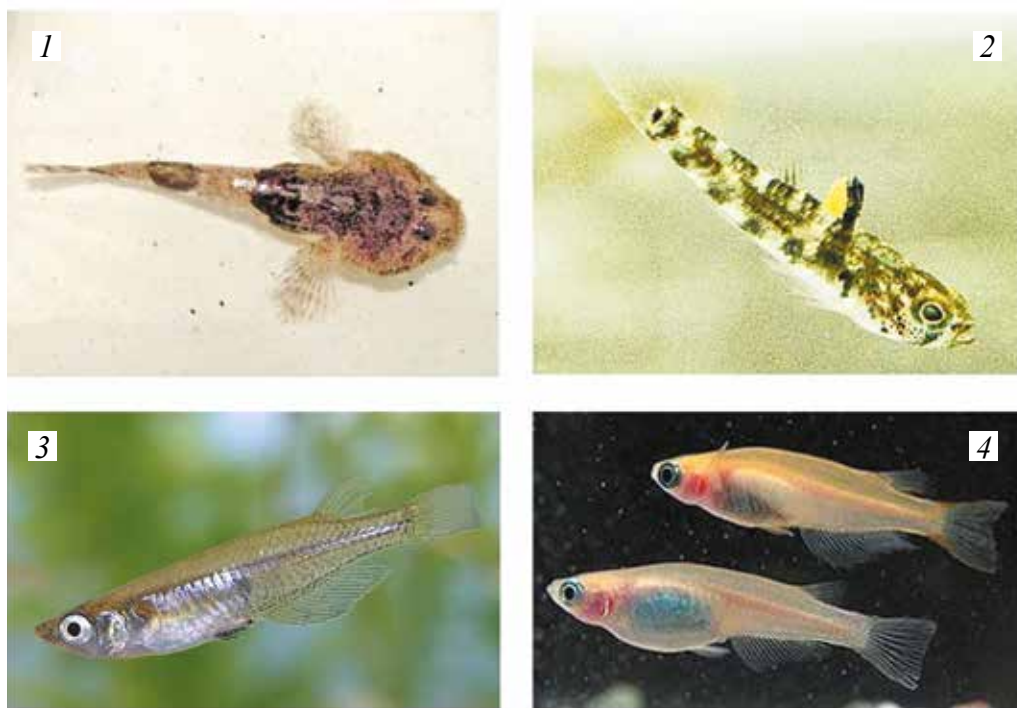


Рис. 2.22. Мелкие рыбы: 1 – зернистая пуголовка; 2 – карликовая пандака (фото из: <http://www.worldofcoins.ru/subjects/pandaka.htm>); 3 – китайская медака (фото из: <http://fish.kiev.ua/pages/ukrfish/ukrfish105.htm>); 4 – японская оризия

Нерге (рис. 2.22, 2). Эта бесцветная и почти прозрачная рыбка обитает в пресных водах Филиппин. Длина тела самцов равна 7,5–9,9 мм, а вес всего 4–5 мг (http://www.nexplorer.ru/news_11581.htm).

Среди рыб Амура самой крупной считают калугу, которая своими размерами мало уступает волжской белуге (официально зарегистрированный вес самой крупной калуги – 1270 кг). Среди наиболее мелких рыб можно отметить китайскую медаку *Oryzias latipes sinensis* (Chen, Hiroshi, Chu) (длина взрослых особей из южных местообитаний 4 см), обнаруженную в бассейне Амура под Хабаровском в 2005 г. в период работы Амурской экспедиции, организованной Дальневосточным отделением РАН (рис. 2.22, 3).

Столь мелкие рыбы, как правило, не имеют промыслового значения, однако очень удобны для экспериментальной научной работы. Например, 2 самца и 2 самки японской оризии *Oryzias latipes* (рис. 2.22, 4) летом 1994 г. на борту космического корабля «Колумбия» совершили 15-дневный полет, во время которого приступили к нересту, отложили и оплодотворили икру. Все взрослые особи и молодь вернулись живыми на Землю, где было проведено их дальнейшее тестирование (<http://habex.ru/paper/642/11985/>).

2.2. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ РЕЧНЫХ ЭКОСИСТЕМ

При исследовании закономерностей функционирования речных экосистем используются как методы общей гидробиологии, так и специфические методы. В последние несколько десятилетий изданы крупные сводки по методам, связанным, например, с изучением химического состава природных вод или оценкой их качества по биологическим показателям [Oglesby et al., 1972; Лурье, 1973; Абакумов, 1983; Унифицированные методы..., 1987; Rosenberg, Resh, 1993; Lenat, Barbour, 1994; Karr, Chu, 1999; Дрюкер, 1999; Брагинский, 2000; Баканов, 2000; Rader et al., 2001; Семенченко, 2004; Безель и др., 2006; Барина и др., 2006; Morse et al., 2007; Моисеенко, 2009; Barbour et al., 2014; и др.], со сбором, количественным учетом различных групп гидробионтов, исследованием их жизненных циклов [Жадин, 1960; Шустов, Широков, 1980; Катанская, 1981; Абакумов, 1983; Салазкин, 1983; Wildish, Kristmanson, 1997; Тиунова, 2003; Шитиков и др., 2012; Богатов, 2005; Астахов, 2017; и мн. др.], оценкой продуктивности водоемов [Odum, 1956; Винберг, 1960, 1968, 1979; Goldman, 1966; Waters, 1977; Бульон, 1981, 1983; Руденко, 1985; Пырина, 1993; Wetzel, Likens, 1991, 2000; Mulholland et al., 2001; Benke, 2010; Алимов и др., 2013; и мн. др.] и пр. Среди опубликованных к настоящему времени многочисленных методических пособий наиболее полное собрание методов изучения речных экосистем изложено в двух изданиях «Methods in Stream Ecology»

[Hauer, Lamberti, 1996, 2006]. Кроме того, в 2017 г. вышел в свет 1-й том 3-го издания «Методов», посвященный изучению структуры речных экосистем [Hauer, Lamberti, 2017] (рис. 2.23).

В настоящей главе кратко рассмотрены методы определения лишь наиболее существенных параметров, необходимых для исследования лотических сообществ, особенно в области ритрали. В частности, здесь приведены способы сбора и количественной оценки водорослей и беспозвоночных, а также методы определения первичной и вторичной продукции гидробионтов, оценки роста и возраста макробеспозвоночных, учета дрейфа донных организмов.

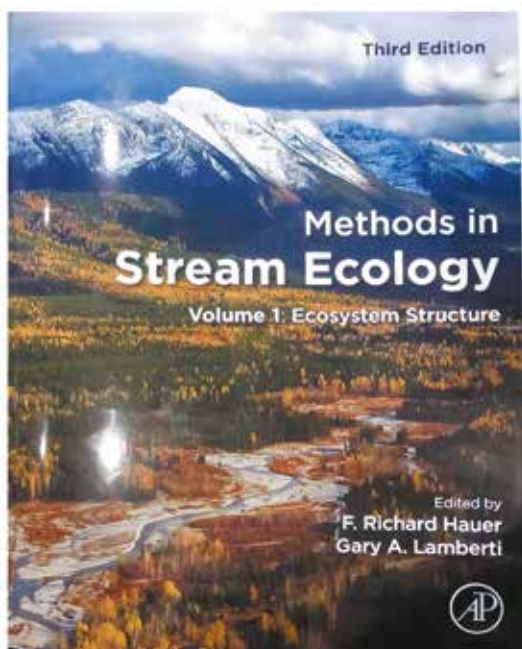


Рис. 2.23. Обложка 1-го тома 3-го издания «Methods in Stream Ecology», 2017 г.

2.2.1. Количественный учет бентосных и планктонных организмов

Перед проведением количественного учета речных бентосных организмов необходимо визуально оценить состояние биотопа. На мелководьях осмотр грунта при необходимости осуществляют с помощью маски для подводного плавания или через стекло, вмонтированное в какой-либо водонепроницаемый тубус. На крупных реках визуальную оценку подводных местообитаний можно провести с использованием автономного подводного дрифтера «HydroSphere™V1» (рис. 2.24) [HydroSphere, 2017]. Этот прибор снабжен видеокамерой, а также системой ориентации в пространстве и датчиками для определения температуры воды, растворенного кислорода, pH, освещенности и электропроводности. Дрифтер имеет несколько режимов плавания (свободный, надводный, подповерхностный, многодневный и с запланированным режимом всплытия). Срок непрерывной работы прибора – до 3 дней, максимальная глубина погружения – до 70 м. Текстовые сообщения о местоположении прибора поступают на мобильный телефон пользователя. Подводный дрифтер «HydroSphere™V1» применяется также для исследования озер и эстуариев.

Известно, что верхние участки горных и полугорных рек отличаются быстрым течением, холодной и прозрачной водой, каменистым или гравийно-галечниково-валунным грунтом. Планктонные организмы на таких участках практически отсутствуют. Основу биоты здесь составляют организмы фито- и зообентоса. Для учета плотности фитобентоса на галечниково-валунных грунтах отдельные камни вручную вынимают из воды и перемещают в таз или ведро. Затем водорослевые обрастания счищают в кювету при помощи скальпеля и щетки с жесткой щетиной (рис. 2.25). Полученные пробы фик-

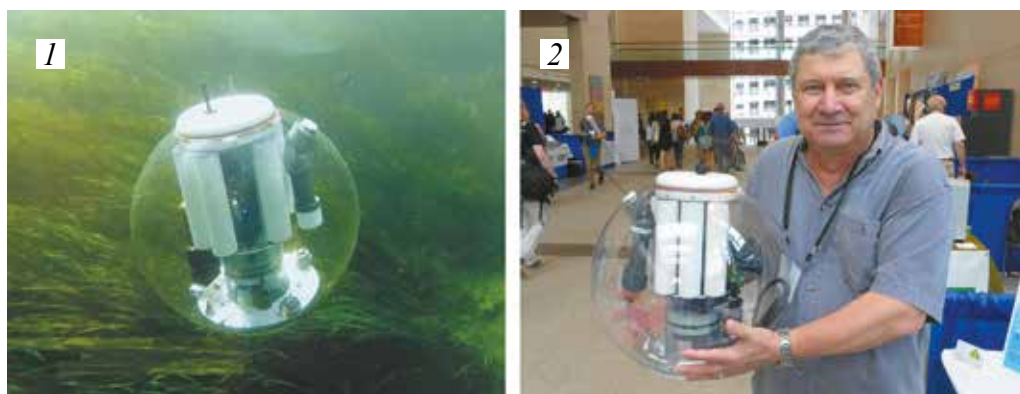


Рис. 2.24. Автономный подводный дрифтер «HydroSphere™V1»: 1 – прибор в режиме свободного подводного плавания, фото из журнала «Environmental monitor», 2017; 2 – выставка научного оборудования на конференции «Society for Freshwater Science» в г. Рале (Северная Каролина, США) 4–8 июня 2017 г. Фото S. Ensign



Рис. 2.25. Сбор фитобентоса с камней. Фото В. Богатова

сируют 3–4 %-ным раствором формальдегида. Для количественной оценки поселений водорослей определяют площадь проекции каждого камня. Для этого отмытые камни укладывают на плотную бумагу так же, как они лежали на грунте, и карандашом, держа его строго перпендикулярно, обрисовывают их проекции, которые затем вырезают и взвешивают. Зная вес (например, 1 см² или 1 дм²) применяемой бумаги, рассчитывают площадь полученных проекций и затем проводят пересчет количества или биомассы смытых организмов на 1 м² площади дна.

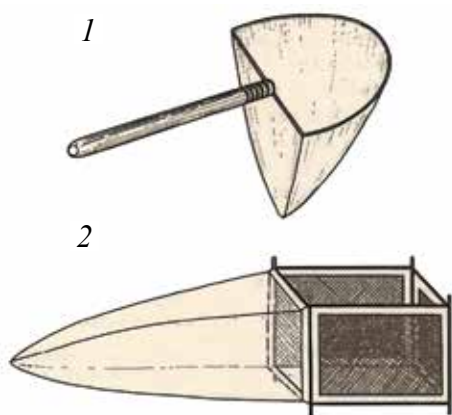


Рис. 2.26. Сачок-промывалка (1) и разборный бентометр (2). Из: [Богатов, 1994]

Аналогичным образом на галечниково-валунных грунтах может проводиться сбор бентосных беспозвоночных, но с обязательным использованием сачка. Наиболее оптимальный для подобных целей сачок можно изготовить из рукоятки и прикрепленного к ней металлического обруча, имеющего вид вытянутого полукруга с диаметром около 0,3 м (рис. 2.26, 1). К обручу прикрепляют заостренный в концевой части мешок, сделанный на участках крепления к обручу из прочной ткани, а на периферии – из

мельничного газа № 23 – капроновой или облегченной шелковой ткани. Номера тканей определяются и маркируются числом отверстий на один погонный сантиметр. Размер ячеи определяется по таблицам 2.1 и 2.2.

Такой сачок служит и промывалкой. Для сбора зообентоса какой-либо камень (валун) одной рукой аккуратно приподнимают над грунтом, а другой одновременно подводят под него сачок.

Таблица 2.1. Сита из капроновой ткани

Номер ткани	Размер отверстия, мкм	Номер ткани	Размер отверстия, мкм
7	1023 ± 110	27	264 ± 28
8	1013 ± 101	29	258 ± 26
9	874 ± 79	32	226 ± 23
10	763 ± 75	35	219 ± 22
11	677 ± 71	38	195 ± 21
12	569 ± 59	43	165 ± 18
13	619 ± 57	46	156 ± 16
14	564 ± 55	49	143 ± 15
15	517 ± 52	52	142 ± 15
16	478 ± 46	55	132 ± 14
17	438 ± 45	58	122 ± 13
18	405 ± 44	61	114 ± 12
19	420 ± 39	64	106 ± 12

Таблица 2.2. Сита из облегченной шелковой ткани

Номер сита	Размер отверстия, мкм	Номер сита	Размер отверстия, мкм
7	1250	43	140
9	900	46	125
11	910	49,	125
15	500	52	110
19	400	55	110
21	360	58	110
23	315	61	100
25	280	64	90
27	250	67	90
29	220	70	80
32	200	71	80
35	180	73	80
38	160	76	71

Затем этот камень в сачке вынимают из воды, помещают в таз или ведро и тщательно отмывают. Сюда же смывают и оказавшиеся в сачке при выемке камней организмы. С участка обычно собирают до 8–12 камней. Смывтую фракцию вновь промывают в сачке-промывалке и фиксируют 75 %-ным этанолом или 3–4 %-ным формальдегидом. Надо иметь в виду, что при сборе макробентоса с отдельных камней недобирают некоторую часть бентоса за счет инфауны, однако этот метод дает представление о плотности бентосных организмов на участках рек, дно которых почти полностью образовано галькой или валунами [Леванидова и др., 1989].

Для количественной оценки зообентоса используют также бентометры различных модификаций. Один из таких бентометров представляет собой прямоугольный каркас, имеющий площадь захвата $0,3 \times 0,4 \text{ м}^2$ и высоту 0,4 м (рис. 2.26, 2). Передняя грань каркаса открыта, два боковых каркаса затянуты газовой сеткой № 15, а к четвертой задней грани прикреплен мешок из газа № 23, длиной до 1–1,5 м. Бентометр плотно устанавливают на грунт до глубины 0,3 м. Камни, оказавшиеся внутри бентометра, вынимают и отмывают в ведре, а имеющийся между камнями наполнитель взмучивают. Собранную мешком бентометра фракцию переносят в ведро, где ранее отмывались камни, затем общую пробу промывают через сачок-промывалку и фиксируют. С учетом того, что площадь захвата подобного бентометра относительно большая, на исследуемой точке отбирается, как правило, 2 пробы.

Среди других типов приборов для сбора зообентоса используются складные либо цилиндрические бентометры (рис. 2.27, 1–5). Поскольку складные бентометры обычно имеют небольшую площадь захвата (чаще всего $0,25 \times 0,25 \text{ м}^2$) и низкую парусность, появляется возможность отбора проб макробентоса при полном погружении прибора в воду до глубины 0,5 м. На больших глубинах при отборе проб на гравийно-галечниково-валунном грунте применяют тяжелые бентометры, два боковых каркаса которых сварены из стальных листов, а к задней стенке прикреплен мешок, нижняя часть которого сшита из прочной ткани, а верхняя – из мельничного газа. Бентометр на штанге и тросах опускают на глубину до 2 м, при этом верхнюю часть грунта, оказавшуюся внутри бентометра, с помощью прикрепленного к длинному шесту узкого скребка перемещают в мешок. Затем бентометр вместе с собранным грунтом поднимают на поверхность. Вынутые камни отмывают, а мелкую фракцию отмучивают.

На мягких грунтах сбор зообентосных организмов проводят с помощью драг, скребков, сачков (рис. 2.27, 6–11) и разного рода дночерпателей (рис. 2.28, 1–7). В особо сложных случаях сбор донных организмов осуществляют с использованием водолазной техники. Для исследования вертикального распределения беспозвоночных в толще грунта используют ручные стержневые микробентометры, которые могут крепиться к штанге разной длины,



Рис. 2.27. 1–3 – складные бентометры; 4 – пластиковый стакан-камера; 5 – цилиндрический бентометр; 6 – закидная драга; 7 – сбор моллюсков с помощью широкого скребка (граблей); 8–11 – гидробиологические сачки разной конструкции

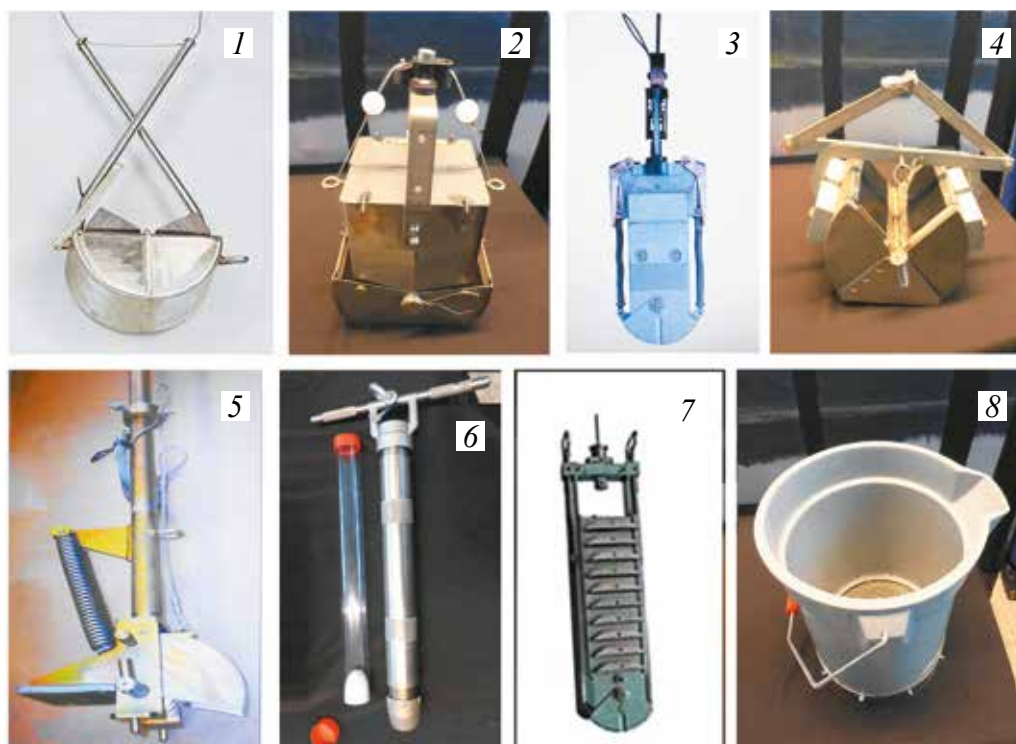


Рис. 2.28. 1 – ковш Ван Вина; 2, 3 – коробчатые дночерпатели; 4 – дночерпатель Петерсена; 5 – штанговый дночерпатель; 6 – ручной стержневой микробентометр с извлеченным пластиковым контейнером: предназначен для отбора донных осадков до 20–25 см глубины; 7 – стратификационный дночерпатель: предназначен для отсечения грунта слоями толщиной 30 мм; 8 – ведро для промывки дночерпательных проб

либо стратификационные дночерпатели (рис. 2.28, 6, 7). Для промывки дночерпательных проб удобно пользоваться специальным промывочным ведром (рис. 2.28, 8).

Фито- и зоопланктон на равнинных участках рек отбирают либо планктонными сетками, например сетью Апштейна или Джэди, либо батометрами, например батометром Рутнера или Молчанова (рис. 2.29).

Разборку гидробиологических проб проводят в лаборатории с помощью световых микроскопов (бинокляров). При определении мелких гидробионтов в последнее время применяют различные микроскопы с выводом изображения на монитор компьютера (рис. 2.30, 1–3). Кроме того, учет и распознавание планктонных водорослей и зоопланктона в водной пробе возможен в автоматическом режиме на приборах FlowCAM Масго (рис. 2.30, 3, 4), которые обеспечивают быструю характеристику частиц, в том числе водорослей и беспозвоночных. Прямые изображения на основе измерения размера и формы частиц позволяют дифференцировать типы частиц в гетерогенной смеси.

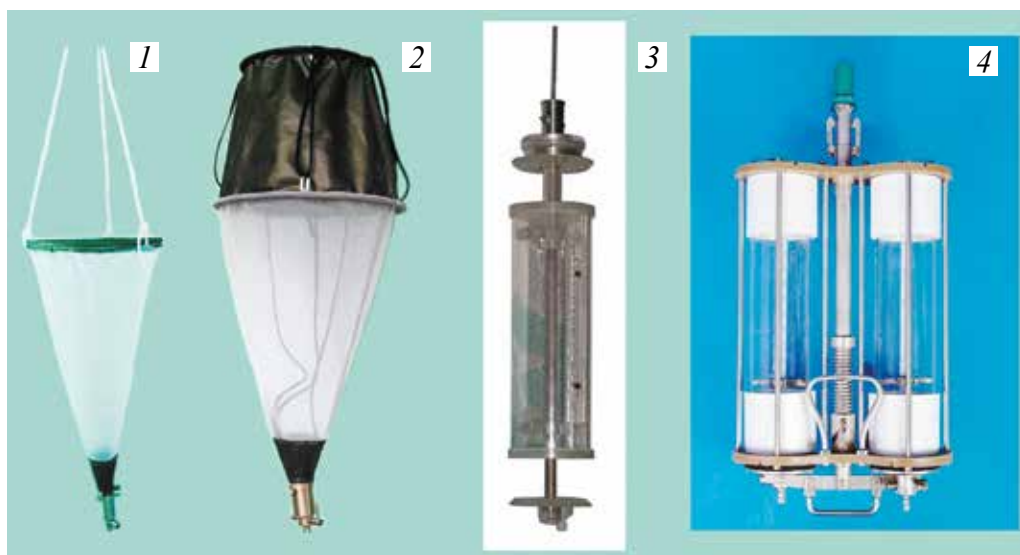


Рис. 2.29. Орудия лова планктонных организмов: 1 – сеть Апштейна, 2 – сеть Джеди, 3 – батометр Рутнера, 4 – батометр Молчанова

При сборе имаго водных насекомых используют разного рода имагоуловители, ловушку Малеза (рис. 2.31, 1), световые ловушки с кюветой, заполненной фиксатором (рис. 2.31, 2), белую плотную ткань, помещаемую в сумеречное и ночное время рядом с водотоком или световой ловушкой, и т.п. Полезно также проводить кошение прибрежной растительности энтомологическими сачками.

2.2.2. Первичная продукция и автоматизированный химический анализ воды

Первичной продукцией называют скорость новообразования органического вещества в процессе фотосинтеза из неорганического углерода автотрофными организмами, отнесенную к единице площади или объема водоема*. Первичную продукцию выражают в единицах массы, энергии или эквивалентных единицах в единицу времени. Некоторая часть преобразованной солнечной энергии в процессе жизнедеятельности автотрофов вновь теряется, т.е. расходуется на их дыхание (R). Та часть энергии, которая аккумулируется в биомассе автотрофов, называется *чистой первичной продукцией* (A_n). При этом сумма A_n и R представляет собой валовую первичную продукцию (A_g):

$$A_g = A_n + R.$$

* Бактерии, способные синтезировать органическое вещество из неорганических питательных веществ в процессе хемосинтеза, здесь не рассматриваются, поскольку они встречаются в специфических местах и в процессе хемосинтеза не выделяют кислород.

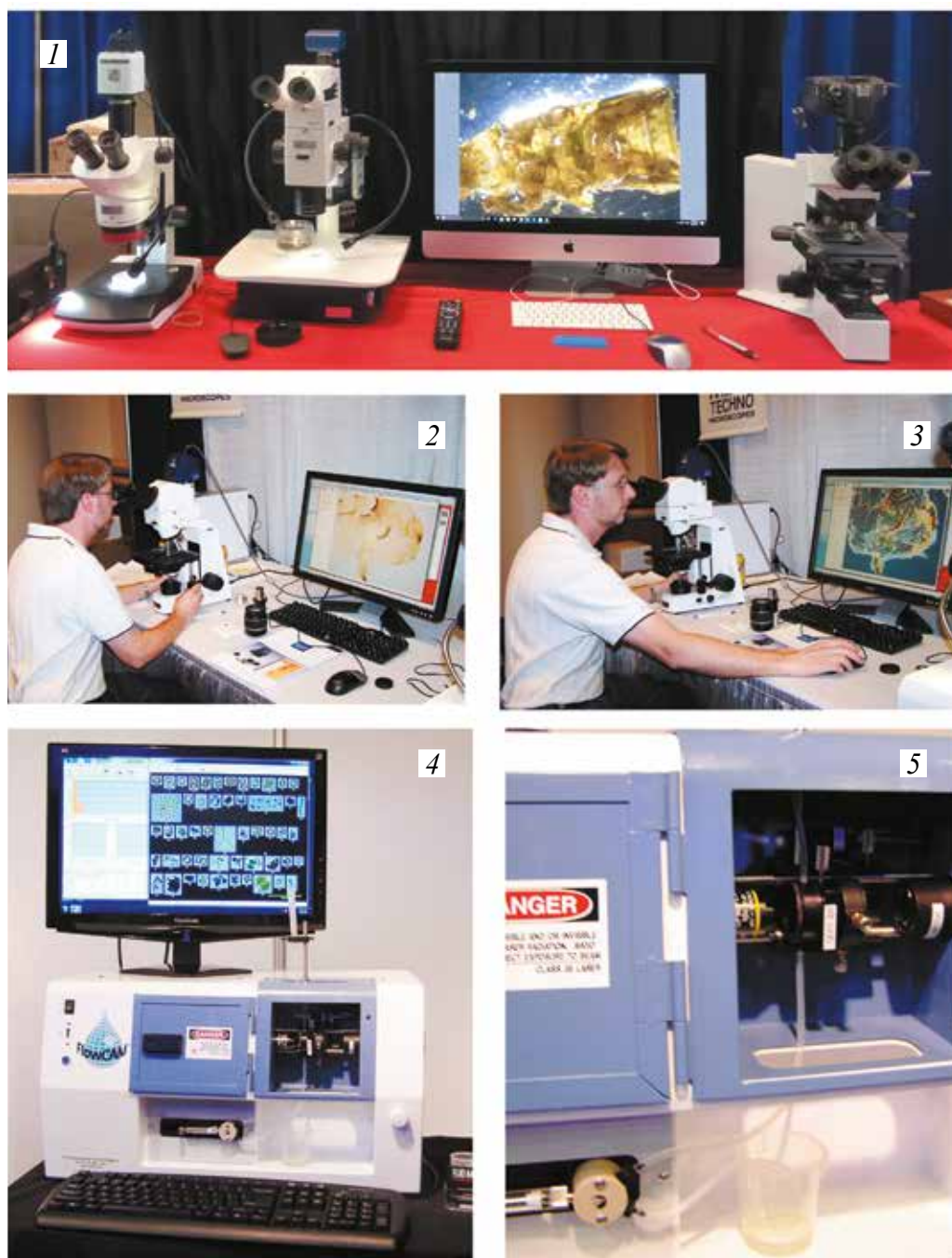


Рис. 2.30. 1 – различные типы микроскопов; 2, 3 – определение под микроскопом гидробионтов с выводом изображения на экран монитора; 4, 5 – прибор FlowCAM для учета и распознавания водорослей и зоопланктона в планктонной пробе (4 – общий вид прибора; 5 – установка стакана с планктонной пробой). Фото В. Богатова



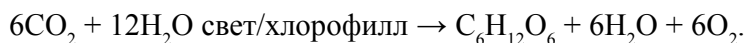
Рис. 2.31. Сбор имаго водных насекомых ловушкой Малеза (1) и световой ловушкой (2).
Фото В. Богатова

Суммарную продукцию всех автотрофов, отражающую величину первичной продукции водоема, называют *первичной продукцией экосистемы* [Алимов, 2000].

Обычно принимают, что затраты на дыхание водорослей в среднем достигают 15–20 % валовой первичной продукции. Для макрофитов чистая первичная продукция представляет собой весь их урожай на корню, умноженный на 1,2 [Распопов, 1985].

Количество созданного органического вещества в значительной степени определяет направление и скорость внутриэкосистемных процессов. В то же время в верховьях рек лесной зоны в потоках энергии может преобладать аллохтонное органическое вещество, но и в этом случае продуценты могут быть важным пищевым ресурсом для многих первичных консументов.

Известно, что в процессе фотосинтеза энергия солнечной радиации, поглощенная растениями, трансформируется в потенциальную энергию органических веществ, синтезируемых ими с участием ферментных систем, связанных с хлорофиллом. Этот процесс и его конечный результат могут быть выражены в виде уравнения, которое представляет собой основу для разработки методов измерения первичной продукции [Винберг, 1960; Бульон, 1983]:



Таким образом, при расщеплении воды образуется газообразный кислород (поэтому этот процесс иногда называют *кислородным фотосинтезом*), а из диоксида углерода и восстановленного из воды водорода синтезируются углеводы ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) и вновь образуется вода. В темноте фотосинтез прекращается, одновременно прекращается потребление CO_2 из среды и выделение эквивалентного количества кислорода. Процессы дыхания у растений в темноте идут

с той же скоростью, что и на свету. Исходя из приведенного выше уравнения окисленного фотосинтеза, по количеству кислорода, выделенного при фотосинтезе, или ассимилированного углерода нетрудно рассчитать количество образовавшихся углеводов, в частности глюкозы ($C_6H_{12}O_6$). Согласно этому уравнению, одна молекула CO_2 эквивалентна одной молекуле O_2 . В этом случае *ассимиляционный коэффициент* ($AK = O_2/CO_2$) и *дыхательный коэффициент* ($ДК = CO_2/O_2$) оказываются равными единице. В то же время углеводы представляют собой первичный продукт фотосинтеза, из которого создаются затем органические вещества растений. Для этих веществ средние значения ассимиляционного и дыхательного коэффициентов составляют 1,12 и 0,89 соответственно. Количество синтезированных органических веществ по объему выделенного кислорода или ассимилированного в процессе фотосинтеза углерода следует рассчитывать с учетом приведенных значений. Эти же значения необходимо учитывать при сопоставлении первичной продукции и деструкции в водоемах.

Первичная продукция может быть выражена в различных эквивалентных единицах. При переходе от одних единиц к другим принимается, что энергетический эквивалент кислорода при окислении органических веществ (ОВ) смешанного состава равен 3,4 кал/мг О, а также, что в органическом веществе содержится 46 % углерода от его массы. При средних значениях получают следующие переходные коэффициенты: 3,2 мгО = 1 мгС; 10,06 кал = 1 мгС; 0,69 мг ОВ = 1 мгО; 2,15 мг ОВ = 1 мгС.

Среди методов определения первичной продукции широкое применение нашли *кислородный и радиоуглеродный методы*, в том числе при определении продукционных возможностей перифитона [Ассман, 1953]. В основе кислородного метода лежит определение кислорода в воде из водоема, помещенной в светлые и затемненные склянки. С помощью этого метода по уменьшению содержания растворенного кислорода в воде затемненной склянки, по сравнению с исходным, определяют скорость деструкции органических веществ, связанной с тратами на обмен организмов планктонного сообщества. При оценке первичной продукции радиоуглеродным методом в пробу воды вносят изотоп углерода ^{14}C в виде карбоната или гидрокарбоната натрия с известной радиоактивностью. После экспозиции склянок воду отфильтровывают через мембранный фильтр и затем определяют на фильтре радиоактивность клеток планктона. Валовая первичная продукция (A , мг С/л) рассчитывается по формуле:

$$A = (r_d/R_d)C,$$

где C – содержание CO_2 в воде, мг С/л; r_d – радиоактивность планктона на фильтре; R_d – радиоактивность вещества, внесенного в склянку.

В речных экосистемах в условиях высокой турбулентности потока фитопланктон практически отсутствует, и первичная продукция может образовываться только в результате фотосинтеза организмов фитобентоса (в ритрали это водоросли, цианобактерии, бриофиты и сосудистые макрофиты). Существование автотрофов в условиях турбулентного потока накладывает определенные ограничения на применение кислородного и радиоуглеродного методов, поскольку при их использовании исследуемые пробы воды изолируются от среды в склянках или мезокосмах. В связи с этим для водотоков был разработан метод определения фотосинтетических процессов по балансу кислорода или диоксида углерода вне изолированных емкостей. При этом учитывается временной ход содержания в воде исследуемых газов. Для лотических систем данный метод впервые был введен Одумом [Odum, 1956]. В основе метода лежит предположение, что изменение концентрации растворенного газа (C) связано с фотосинтезом (A), дыханием сообщества (R) и газообменом с атмосферой (E) при условии, что поступление газов с поверхностным стоком или с подземными водами является незначительным. В этом случае:

$$C = A - R \pm E.$$

В практике измерения баланса газов могут проводиться как на одном створе (*single station method*), так и на двух створах (*upstream-downstream method*). В последнем случае мы имеем возможность проследить динамику метаболизма в условиях движения воды. В России метод двух створов был доработан Лебедевым для условий неустановившегося движения воды [Лебедев и др., 1978; Лебедев, 1993]. В качестве рабочей гипотезы им было выдвинуто предположение, что при неустановившемся режиме каждой величине расхода соответствует определенная интенсивность трансформации органического вещества. В этом случае при введении соответствующей температурной поправки между величинами трансформации органического вещества и расходами воды должна отмечаться функциональная связь, которая наиболее четко будет проявляться в ночные часы, когда фотосинтез равен нулю. Основное уравнение для расчета трансформации органического вещества в единицу времени имеет вид:

$$(A-R)' = (1-0,5k_2 \mathcal{L})(C_i-C_s)/\mathcal{L},$$

где $(A-R)'$ – трансформация органического вещества в единицу времени; C_s – насыщающая концентрация кислорода; C_i – фактическая концентрация кислорода; k_2 – константа атмосферной реаэрации; $\mathcal{L}$ – время добегаания воды; A – фотосинтез; R – дыхание [Лебедев и др., 1978].

В качестве показателя первичной продукции водорослей и цианобактерий широко используется содержание хлорофилла a . Определение содержания хлорофилла a в фитопланктоне и фитобентосе позволяет: 1) выразить биомассу продуцентов в единицах фотосинтетически активной биомассы, состоящей

из хлорофилла *a* (в разных водорослях содержание хлорофилла *a* может быть различным, но величина первичной продукции зависит в первую очередь от концентрации хлорофилла *a*, а не от биомассы водорослей); 2) рассчитать значения первичной продукции планктона по концентрации хлорофилла *a*, которая закономерно связана со скоростью образования органических веществ в процессе фотосинтеза.

Суть метода заключается в том, что тем или иным способом экстрагируют хлорофилл и концентрацию хлорофилла *a* определяют на спектрофотометрах или флуориметрах. Обычно фитопланктон из известного объема воды концентрируют фильтрованием на мембранном фильтре, высушивают, а затем экстрагируют из него пигменты в определенном объеме 90 %-ного ацетона.

Уравнение для расчета количества хлорофилла *a*, принятое рабочей группой ЮНЕСКО, имеет вид [Report ..., 1966]:

$$C_{\text{хл}} = (11,64E_{663} - 2,16E_{645} + 0,1E_{630}) \times v/Vl,$$

где $C_{\text{хл}}$ – концентрация хлорофилла *a*, мг/м³; E_{663} , E_{645} , E_{630} – экстинкция (ослабление света) при длине волн 663, 645, 630 нм соответственно; v – объем экстракта, мл; V – объем пробы, л; l – длина светового пути в экстракте, см. В показания, полученные в красной части спектра при данных значениях экстинкции, следует вносить поправку, вычитая из них оптическую плотность экстракта на длине волны 750 нм. Учитывается неспецифическое поглощение света на этой длине волны, связанное с мутностью, различными взвесями и т.п.

Для расчета первичной продукции по содержанию хлорофилла *a* в планктоне необходимо знать так называемое *ассимиляционное число* (АЧ), которое представляет собой отношение первичной продукции за $ч$ к массе хлорофилла *a* и выражается в мг С за $ч$ на мг хлорофилла *a* в условиях освещенности, к которым данная система приспособлена. Ассимиляционное число, выраженное в мг С за сут/мг хлорофилла *a*, называется *суточным ассимиляционным числом* (САЧ). Некоторые исследователи АЧ и САЧ выражают в единицах массы кислорода, выделяемого при фотосинтезе, или CO_2 , ассимилированного в его процессе.

Среднее ассимиляционное число на глубине оптимального фотосинтеза зависит от трофического статуса водоема и физиологического состояния водорослей и равно примерно 2 мг С на мг хлорофилла *a* в $ч$. Значение первичной продукции для слоя воды, где условия для фотосинтеза наиболее благоприятны, может быть получено умножением значения содержания хлорофилла *a* на АЧ или САЧ. Поскольку ниже и выше этого слоя условия для фотосинтеза ухудшаются, общая продукция в столбе воды или на единицу поверхности зеркала водоема может быть рассчитана только с учетом отклонения освещенности от оптимального значения на различных участках фотической зоны.

С 1990-х годов широкое распространение получили инструментальные методы оценки первичной продукции фитопланктона и концентрации хлорофилла *a* на основе явления флуоресценции. Это явление возникает в процессе фотосинтеза, когда хлорофилл *a* поглощает энергию в голубой части спектра (430–440 нм) и излучает ее в красной части спектра (680–685 нм). Падающий свет индуцирует флуоресценцию, которая имеет положительную корреляцию с концентрацией хлорофилла *a* в среде и величиной первичной продукции фитопланктона или фитообрастаний. Интенсивность флуоресценции измеряется с помощью пассивных или активных методов. В первом случае с помощью фотометра, оборудованного полосным фильтром, измеряется интенсивность естественной флуоресценции, вызванной солнечной радиацией на длине волны 683 нм. К недостаткам этого метода относится непостоянство интенсивности и спектральных характеристик флуоресценции в зависимости от режима биогенных веществ, уровня солнечной радиации [Vernet, Smith, 2007]. Поэтому в настоящее время в основном используются активные методы ее измерения с помощью специальных приборов – флуориметров (рис. 2.32), которые индуцируют последовательные вспышки света разной интенсивности. В этом случае измерения флуоресценции основаны на динамике ее затухания в первые миллисекунды после вспышки. Применение современных флуориметров позволило значительно повысить чувствительность и точность метода и одновременно, измеряя флуоресцентный сигнал на разной длине волн, оценивать вклад в биомассу и продукцию различных групп водорослей, например зеленых и диатомовых, а также цианобактерий [Hall et al., 2007]. Несомненное достоинство метода – возможность проводить измерения первичной продукции *in situ* при естественном освещении, режиме биогенных веществ, течении и пр., не изолируя в склянках или мезокосмах объемы воды. К недостаткам метода относится сложность и слабая изученность биофизических механизмов процесса флуоресценции в меняющихся условиях внешней среды, что требует их тщательной калибровки [Алимов и др., 2013].

Среди различных модификаций флуориметров в последние годы все более широкое применение находят портативные донные «BenthosTorch» и водорослевые «Bbe AlgaeTorch» фонари (рис. 2.32, 1–3). Донный фонарь предназначен для быстрого определения концентрации бентосных зеленых и диатомовых водорослей, а также цианобактерий. Он является экономически эффективным инструментом, позволяющим выполнять измерения плотности и состава водорослей на различных субстратах в режиме реального времени. Каждое измерение проводится менее чем за 15 с. Полученные результаты отражаются на мониторе прибора и хранятся во внутренней памяти. Точки отбора проб фиксируются GPS-датчиком. Водорослевый фонарь применяется для аналогичного измерения концентрации водорослей и цианобактерий в планктоне. Для

полного измерения требуется менее 20 с, причем для получения результатов никакого предварительного отбора планктонных проб и их подготовки не нужно. Среди глубоководных портативных приборов обращает на себя внимание флуориметр «DIVING-PAM-II», предназначенный для изучения фотосинтеза *in situ* подводных растений до глубины 50 м (рис. 2.32, 4).



Рис. 2.32. Водные флуориметры и зонды: 1, 2 – донный фонарь (BenthosTorch), фото В. Богатова; 3 – водорослевый фонарь (Bbe AlgaeTorch), из: <http://www.bbe-moldaenke.de/en/products/chlorophyll/details/algaetorch.html>; 4 – подводный флуориметр «DIVING-PAM-II»; 5 – водный зонд «Manta+30»; 6 – гидролабораторный зонд «DataSonde 5X-DS5X».

Фото В. Богатова

Следует отметить, что в последнее время флуориметрические датчики, позволяющие исследовать концентрацию водорослей и цианобактерий, встраиваются в приборы для комплексного мониторинга водной среды, которые называются водными зондами. Например, одни из таких зондов – «Manta+35» (рис. 2.32, 5) и «Manta+40» – состоят соответственно из 10 и 12 датчиков, в том числе флуориметров. С помощью таких водных зондов можно получить не только флуориметрические данные, но и информацию о глубине, температуре воды, содержании растворенного кислорода и углекислого газа, pH, освещенности, электропроводности, мутности, прозрачности, концентрации ионов аммония, натрия, кальция, хлора, бромистых соединений, содержании нитратов, нефтепродуктов и других поллютантов. Для условий сильного антропогенного загрязнения можно рекомендовать современный гидролабораторный зонд DataSonde 5X-DS5X (рис. 2.32, 6), способный одновременно измерять до 16 параметров, в том числе хлорофилл *a* и цианобактерии.

При продукционных исследованиях появляется необходимость учета в воде биогенных элементов, главным образом фосфора, азота и кремния. Для их измерения используются либо модульные, либо погружаемые автоматизированные системы химических измерений. В частности, в стационарных и полевых условиях широко применяется модульная система «NuLAB» (рис. 2.33, 1), с помощью которой проводится автоматизированный высокоточный анализ (имеются высоко- и низкочувствительные детекторы) от одного до пяти питательных веществ: фосфатов, нитратов, нитритов, аммония и силикатов. Время измерения составляет от 9 (нитриты) до 16 (силикаты) минут. Калибровка

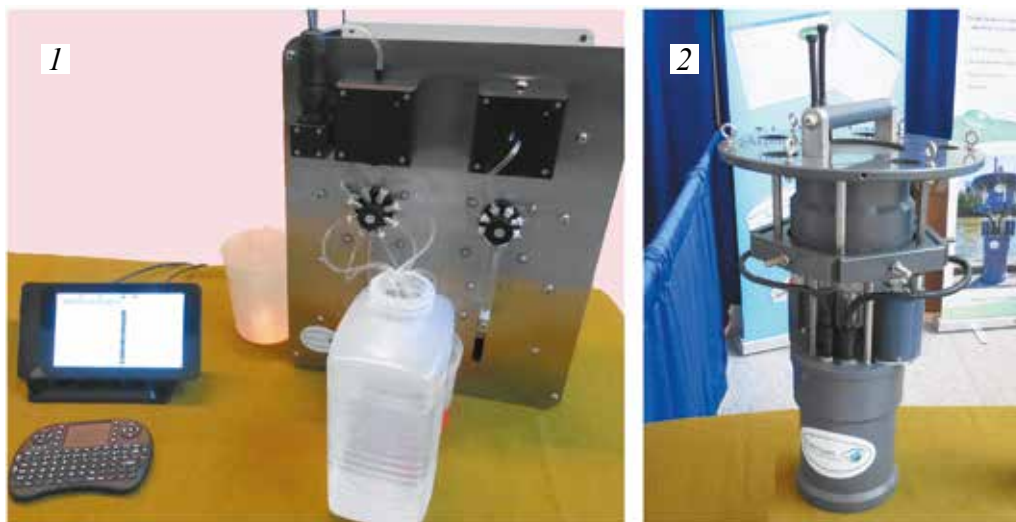


Рис. 2.33. 1 – модульная автоматизированная система химических измерений для анализа растворенных питательных веществ «NuLAB»; 2 – подводный химический анализатор «EcoLAB». Фото В. Богатова

используемых каналов позволяет «NuLAB» поддерживать точность анализов при изменении условий окружающей среды (например, температуры или давления). Система может быть сопряжена с радио- или сотовыми модемами и специальным программным обеспечением.

В полевых условиях для измерения вышеперечисленных питательных веществ применяется подводный многоканальный химический анализатор «EcoLAB» (рис. 2.33, 2), погружение которого рассчитано до 50 м. Прибор снабжен аккумулятором. Забор фиксированного объема воды для анализа, ее смешивание с реагентами и промывка осуществляются автоматически при помощи шприцевого насоса. Анализатор может быть использован для длительного мониторинга питательных веществ. В этом случае предусмотрен контроль над биообрастаниями.

2.2.3. Вторичная продукция

Продукция популяций гетеротрофных организмов за определенное время представляет собой сумму приростов всех составляющих популяцию особей, как бывших в наличии к началу рассматриваемого отрезка времени, так и рожденных за это время. Причем в продукцию включают не только особей, оставшихся к концу данного периода, но и тех особей, которые в силу выедания, отмирания или других причин не вошли в конечную биомассу популяции [Алимов, 1989]. Обычно выделяют соматическую и генеративную продукции, представляющие собой соответственно прирост массы (энергии) тела и прирост массы (энергии) выметанных половых продуктов. В продукцию также входит и прирост массы других отторгаемых продуктов: экзувии, слизи, метаболиты.

Следует различать скорость продукции в момент времени $t - P'(t)$ и продукцию за некоторый период $(t_1, t_2) - P(t_1, t_2)$. Скорость продукции популяции выражается равенством:

$$P'(t) = dB/dt + Al/dt,$$

где dB/dt – скорость прироста биомассы популяции в результате соматического роста; Al/dt – скорость отчуждения, включающая в себя скорости прироста половых продуктов, экзувиев, метаболитов, а также скорость элиминации. При этом продукция за интервал времени t_1, t_2 численно равна интегралу скорости продукции в этом интервале:

$$P(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} P'(t) dt.$$

Выбор способа расчета продукции популяций животных зависит от типа роста и биологии размножения изучаемых организмов, так как эти характеристики во многом определяют различия размерно-возрастной структуры популяций разных видов. Однако в условиях функционирования речных экосистем

размерно-возрастная структура гидробионтов в определенной точке биотопа, а также динамика их численности и биомассы могут определяться и миграциями организмов, вызванными дрейфом или периодическими изменениями расхода и уровня воды. Например, при спаде уровня воды плотность донных животных за счет их перемещения может резко повышаться, а при подъеме уровня – снижаться. При этом заметно может изменяться и размерная структура популяции. В этом случае применение классических способов расчета продукции, например методом Бойсен-Иенсена, при которых используются данные двух наблюдений в моменты времени t_1 и t_2 , может привести либо к завышению величины продукции (при концентрации гидробионтов), либо к получению ее отрицательных значений (например, при расселении или дрейфе организмов).

Очевидно, что при крайне высокой динамике плотности организмов наиболее универсальным методом оценки продукции их популяций является метод интегрирования скорости прироста составляющих популяцию особей, при котором необходимо заранее знать количественные характеристики скорости роста животных. По исходным данным рассчитывают среднюю скорость продукции популяции (P'), наблюдаемую в дату отбора проб, как сумму скорости продуцирования отдельных возрастных групп (P_i):

$$P' = P_i.$$

Скорость продуцирования каждой возрастной группы рассчитывается как произведение ее (dW/dt) на среднюю численность (N_i) животных этой группы:

$$P_i = (dW/dt) N_i.$$

Если принять, что найденное значение P_i , например за сутки, близко к средней скорости продукции за равный период времени (t_1, t_2), тогда продукцию $P(t_1, t_2)$ за это время можно найти путем умножения (P_i) на продолжительность данного периода. Если допустить, что изменение (P_i) между отдельными датами наблюдения идет линейно, тогда продукцию за достаточно продолжительный период времени, например за сезон, можно найти по уравнению:

$$P(t_1, t_2) = 1/2[P'(t_1) + P'(t_2)] + \dots + 1/2[P'(t_{n-1}) + P'(t_n)](t_n - t_{n-1}).$$

При таком способе расчета показателя $P'(t)$ отражают состояние популяции в даты наблюдений, поэтому полученная величина продукции включает изменение возрастного состава популяции в результате пополнения и элиминации в периоды между отдельными наблюдениями. Очевидно, что чем чаще проводятся наблюдения, тем точнее они отражают изменения состояния популяции во времени и тем точнее рассчитывается продукция.

Отметим, что численность животных в возрастных группах на 1 м² площади грунта находят из данных плотности и размерного состава популяций.

Для описания соотношений между линейными размерами (L) и массой тела гидробионтов (W) используют уравнение аллометрического роста:

$$W = aL^b,$$

где a , b – константы уравнения; a – константа, равная W при $L = 1$.

Если в процессе роста животного сохраняется геометрическое подобие формы его тела, то $\beta = 3$. Когда форма тела меняется, то при $\beta < 3$ получаем отрицательную аллометрию, а при $\beta > 3$ – положительную. При отрицательной аллометрии, когда L обозначает длину тела, животное в процессе роста «удлинняется». Такой рост характерен, например, для червей. При положительной аллометрии животное в процессе роста «укорачивается» (становится массивнее). Параметры уравнений степенной функции находят методом наименьших квадратов, а их доверительные интервалы – по методу, предложенному Умновым [1976].

В отдельных случаях продукцию популяций некоторых организмов рассчитывали с использованием величин удельной продукции, приведенных, например, в работе Заики [1972]. Для личинок поденок удельную продукцию принимают как 0,018, личинок хирономид – 0,025, амфипод – 0,005 сутки⁻¹. В необходимых случаях в величину удельной продукции вносят температурную поправку по Крогу [Винберг, 1968]. При этом принимают, что оптимальная скорость продуцирования гидробионтов соответствует средней за летний сезон температуре их обитания.

При оценке продукции биоценозов беспозвоночных учитываются трофические связи между организмами. В наиболее упрощенном виде популяции гидробионтов или их отдельные размерные группы разделяются на нехищных и хищных животных. Поскольку часть продукции отдельных популяций потребляется внутри биоценоза входящими в него хищниками, тогда продукция биоценоза (P_b) может быть представлена как разность между продукцией нехищных животных (P_f), выраженной в единицах энергии, и энергией (R_p), рассеиваемой хищниками в процессе обмена [Алимов, 1989]:

$$P_b = P_f - R_p.$$

Как указывает Алимов [1989], в более узком смысле продукцию, например, биоценоза бентосных животных можно рассматривать при определении продукции биомассы конкретных видов, доступной для непосредственного потребления хищниками (например, рыбами), не входящими в состав донного сообщества. Тогда:

$$P_b = P_f + P_p - C_p,$$

где P_p и C_p – продукция и рацион хищников, входящих в состав биоценоза соответственно.

2.2.4. Методы изучения роста и возраста животных

При изучении роста и возраста водных животных обычно используют наблюдения в лабораторных условиях или в садках, выставляемых в местах обитания животных; наблюдения в естественных условиях по измерениям роста меченых животных; определение приростов по фиксированным возрастным признакам (морфологическим, структурным, физико-химическим); анализ размерно-возрастной структуры популяций.

При наблюдениях за ростом животных в садках проводят периодические промеры и взвешивания животных, на основании которых судят о характере и скорости их роста. При лабораторных экспериментах следует строго соблюдать неизменными условия внешней среды, особенно температуру и обеспеченность пищей, а также ее качество. Серии продолжительных наблюдений с небольшими интервалами между последовательными измерениями позволяют детально изучить рост животных и выявить его индивидуальную изменчивость.

Время наблюдений может быть сокращено за счет одновременного использования в экспериментах животных, относящихся к разным возрастным группам. При этом подопытные животные всех возрастных групп оказываются в одинаковых условиях. Данные такого рода не дают представления о росте конкретной особи, но характеризуют осредненную зависимость линейных размеров или массы от времени роста некоторой средней особи данной группы.

В то же время у животных, имеющих жесткий экзоскелет, периодически сбрасываемый ими в момент линьки, основной рост размеров тела и его массы (за счет обводнения тканей) наблюдается в короткий промежуток времени, следующий сразу после линьки (рис. 2.34). Затем наступает продолжительный период, когда размеры тела очень мало увеличиваются (в основном за счет растяжения межсегментных перегородок). В этом случае для корректной оценки скорости роста животных необходимо учитывать линочный цикл, например проводить промеры размеров тела через промежуток времени, соответствующий его продолжительности [Богатов, 1991; Тиунова, 1993].

При наблюдениях за ростом меченых животных в природе их периодически

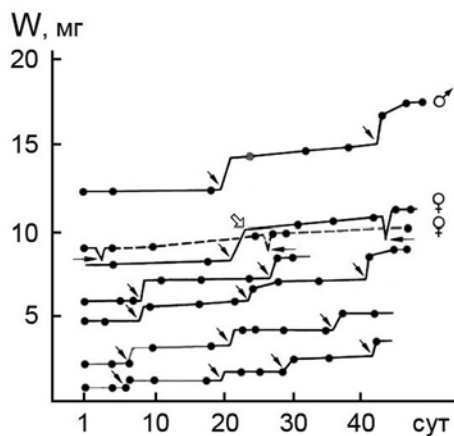


Рис. 2.34. Рост сырой массы тела (W , мг) у отдельных особей *Gammarus koreanus* (стрелками показаны моменты сброса экзuvia, широкой стрелкой — момент первого вымета яиц у самки).

Из: [Богатов, 1991]

отлавливают и измеряют. Сбор данных обычно осложняется малым возвратом животных при последующих поимках. Этот метод можно использовать применительно к крупным животным и животным с прочными наружными покровами или наружным скелетом (это, например, крупные ракообразные, моллюски, рыбы). В качестве меток используются различные красители, краски, бирки и т.п.

Методы определения прироста по возрастным признакам основываются на анализе циклических элементов, чаще всего так называемых колец или линий роста, которые отмечаются, например, на раковинах моллюсков (рис. 2.35), чешуе или отолитах рыб. Эти элементы образуются через определенные периоды времени – обычно через 1 год. Для определения характера и скорости роста животных измеряется расстояние между соседними кольцами. Эти методы требуют точного определения периодичности формирования указанных образований и установления продолжительности временного цикла.

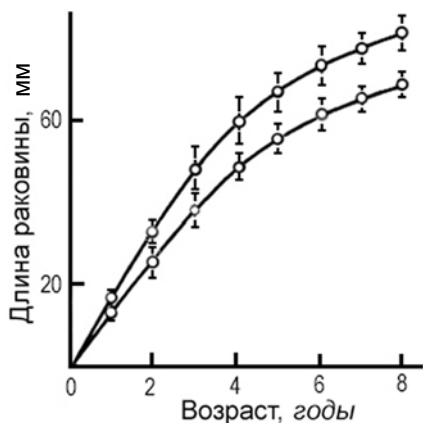


Рис. 2.35. Кривые линейного роста у двух размерных форм *Colletopterum piscinale* (Nilsson), полученные при анализе линий роста. Из: [Алимов, Богатов, 1975]

Рост многих животных может быть изучен путем анализа серии гистограмм частотно-размерного состава популяций, полученных в течение сезона или года. Достоверные результаты получают в тех случаях, когда на гистограммах каждый возрастной класс может быть уверенно выделен в любые периоды времени. Наиболее четко различимы на гистограммах размерно-возрастные группы в популяциях быстро растущих животных, для которых характерен сжатый период размножения. В силу этого на гистограммах таких видов молодь составляет единую размерную группу, надежно отличающуюся по размерам от животных предыдущего поколения. У медленно растущих животных с большой продолжительностью жизни и растянутым

по времени нерестом чаще всего размерные группы трудно различимы. На гистограммах таких видов обычно наблюдается множество зубцов, трудно соотносимых с возрастом.

Возникающие трудности выделения размерных групп на гистограммах выборок могут быть преодолены с помощью метода, предложенного Хардингом [Harding, 1949] и развитого Касси [Cassie, 1950, 1954]. В основе этого метода лежит допущение о том, что в пределах каждой возрастной группы размеры особей распределены в соответствии с законом нормального распределения. Для различения размерных групп Хардинг предложил использовать график,

на оси абсцисс которого отложена функция нормального распределения. Длина каждого отрезка на этой шкале пропорциональна площади, ограниченной кривой нормального распределения, вся площадь которой принимается за 100 %. На оси ординат откладывается частота встречаемости животного каждого размера. В такой системе координат точки любого нормального распределения ложатся вдоль прямой линии. На гистограмме полимодальных частотно-размерных распределений животных в популяции следует ожидать столько прямых линий, сколько имеется в данной популяции отдельных размерных групп животных, соответствующих конкретным возрастным группам (рис. 2.36).

2.2.5. Количественная оценка дрейфа речного бентоса

При количественной оценке дрейфа беспозвоночных необходимо учитывать чрезвычайную динамичность этого процесса. Отлов мигрирующих в толще воды гидробионтов осуществляется с помощью стандартных планктонных сеток, мальковых ловушек, а также специальных дрейфовых сетей, сачков или ловушек разной конструкции (рис. 2.37, 1–3). Выбор орудий лова, их размеры и время экспозиции зависят как от задач исследования, так и от особенностей выбранного участка реки или ручья: расход воды, количество и размер взвесей, глубина потока и скорость течения воды в точке отбора проб, характер грунта, ряд других факторов.

Время экспозиции дрейфовых сачков может составлять от нескольких минут или даже секунд до 24 ч. При изучении суточной динамики дрейфа пробы

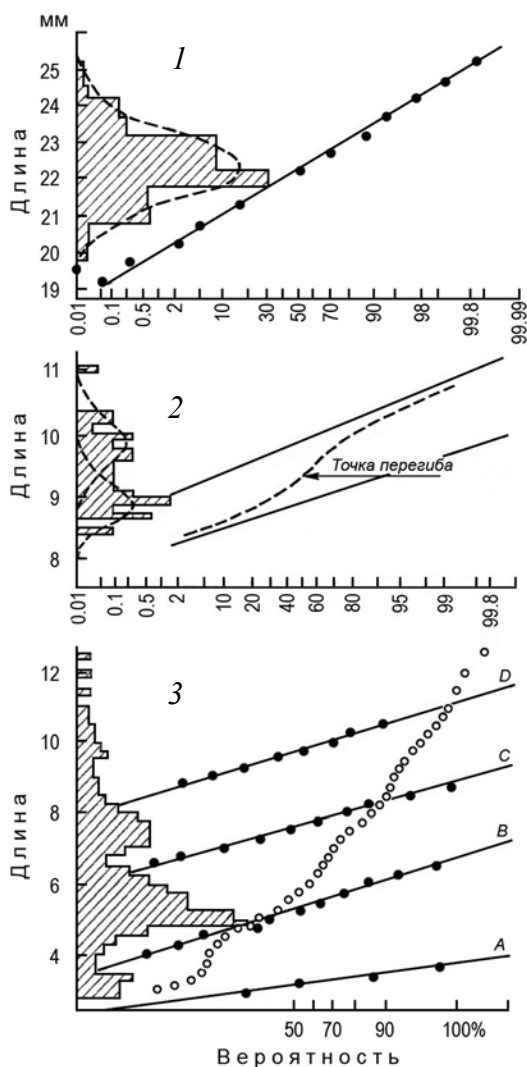


Рис. 2.36. Модальные (1), бимодальные (2) и полимодальные (3) распределения особей в популяции и их трансформация на графике. А, В, С, D – размерные группы животных.

Из: [Cerrato, 1980]

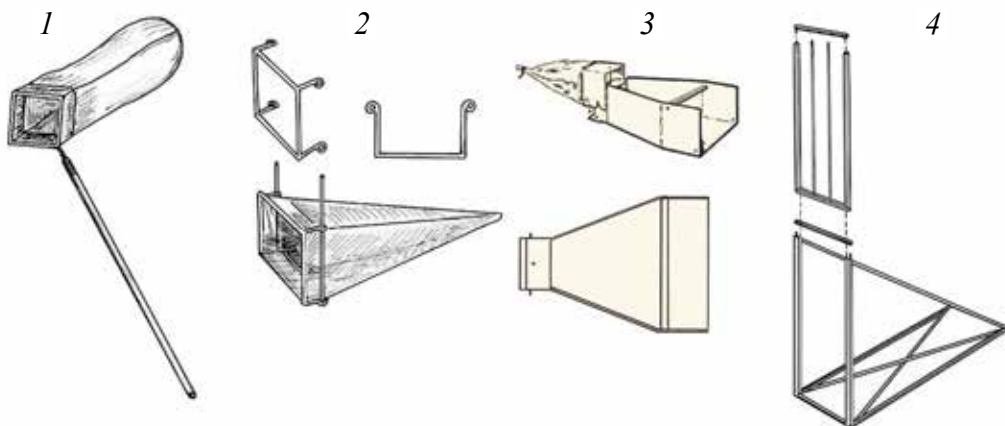


Рис. 2.37. Дрифтовые ловушки (сачки): 1 – из: [Богатов, 1994], 2 – из: [Waters, 1962]; 3 – из: [Goedmakers, 1980]; 4 – каркас для дрифтовых сачков из: [Matter, Hopwood, 1980]

следует отбирать как можно чаще. В этом случае время экспозиции ловушки обычно составляет 5–10 мин. Необходимо помнить, что при более длительной экспозиции ловушек часть пойманных гидробионтов может покинуть сачок или стать жертвой хищников, также оказавшихся в сачке. При высокой интенсивности дрефта или значительной концентрации в воде взвешенных частиц дрифтовая сеть заметно снижает свои фильтрационные характеристики, что отражается на точности уловов [Muehlbauer et al., 2017]. В таких ситуациях необходимое время экспозиции сачка-ловушки делится на части (например, при общей 10-минутной экспозиции ловушку устанавливают 2 раза по 5 мин, или 2 раза по 3 мин и 1 раз – на 4 мин, затем отобранные пробы объединяют в одну). Собранный материал фиксируют 70–80 %-ным этанолом или 3–4 %-ным формальдегидом.

Частота отбора дрифтовых проб в ночной период обычно выше (каждые 0,5 или 1 ч), чем в дневной (каждые 2, 3 или 4 ч). В случае кратковременной экспозиции обычно используют сачок, прикрепленный к длинной рукоятке (рис. 2.37, 1; 2.38, 1), при этом предварительно в точке отбора проб в грунт вбивают шест с небольшой поперечной перекладиной (если шест деревянный, то роль перекладины может выполнять наполовину вбитый в него гвоздь, не до конца ввинченный шуруп или сучок), которая должна располагаться в передней части шеста на определенной глубине. Для отбора пробы дрефта сачок опускают на перекладину на участке крепления сачка к рукоятке. Сачок течением прижимается к шесту и в такой позиции удерживается вручную (рис. 2.38, 1, 2). При длительной экспозиции сачки фиксируют в потоке с помощью кольев, металлических прутьев или двух веревок, каждую из которых одним концом привязывают к боковой части обруча входного отверстия сачка-



Рис. 2.38. Дрифтовые ловушки: 1, 2 – ручная дрифтовая ловушка; 3 – стационарная дрифтовая ловушка, фото В. Богатова; 4 – глубинная ловушка (планктонная сеть) и гидрометрический груз, прикрепленные к тросу лебедки; на входе в ловушку установлена гидрометрическая микровертушка, фото из: [Baxter et al., 2017]; 5 – ловушка для оценки распределения дрейфующих гидробионтов по вертикали потока конструкции М. Астахова (1) [Астахов, 2012] и способы ее установки (6, 7), фото В. Бобровского

ловушки, а другим – к камням или иным тяжелым предметам, которые опускаются на дно по обе стороны от сачка. Иногда поперек русла реки натягивается трос, к которому веревочными шнурами привязывают дрейфовые ловушки. Для установки ловушек, имеющих квадратное или прямоугольное входное отверстие, изготавливают специальные металлические каркасы с вертикально расположенными металлическими стержнями. Сачок надевают на стержни с помощью душек, которые припаяны к боковым краям рамок входного отверстия (рис. 2.37, 2; 2.38, 2). На мелководьях могут использоваться пластиковые конструкции, выполненные в виде сужающегося желоба, в задней части которого имеется съемный сачок (рис. 2.37, 3). На крупных реках для сбора дрейфующих организмов чаще всего применяются стандартные планктонные сетки, которые с помощью карабинов пристегиваются к тросу ручной лебедки, установленной на каком-либо плавсредстве, при этом с нижней стороны ловушки к тросу крепится рыбообразный гидрометрический груз (рис. 2.38, 3), с помощью которого дрейфовая ловушка фиксируется на определенной глубине. На входе в ловушку устанавливается гидрометрическая микровертушка, сигналы которой передаются на борт судна и фиксируют эффективность фильтрации. На основании показаний вертушки рассчитываются объемы воды, профильтрованной сеткой за время экспозиции.

Для оценки распределения гидробионтов по вертикали потока несколько одинаковых сачков располагают друг над другом на специальных каркасах (рис. 2.37, 4) или штанге (рис. 2.38, 5–7). При расчете объема воды, профильтрованной такими сачками, учитывается изменение скорости течения воды по глубине.

По результатам уловов дрейфовых ловушек рассчитывают две основные группы параметров дрейфа [Allan, Russek, 1985]:

1. *Плотность дрейфа (drift density)* – D_D , которая оценивается численностью (биомассой) дрейфующих гидробионтов в определенном объеме воды (1, 100 или 1000 м³) для момента или периода времени;

2. *Интенсивность дрейфа (drift rate)* – D_R , которая оценивается численностью (биомассой) мигрантов, пронесенных через фиксированную площадь сечения потока (входное сечение сачка-ловушки, 1 м² сечения потока, живое сечение водотока и пр.) в единицу времени (если за единицу времени принимаются сутки, то рассчитанную интенсивность дрейфа еще могут называть *скоростью дрейфа – drift velocity*) или за определенный период времени (t_1, t_2): несколько минут, час, сутки, месяц, год и т.п.

Плотность дрейфа (D_D) рассчитывается путем деления улова (численность или биомасса организмов) за время экспозиции (t_1, t_2) на объем воды (м³), профильтрованный сетью за то же время. Полученный результат иногда умножают на 100, реже на 1000, получая количественные показатели плотности мигрантов в 100 м³ и 1000 м³ воды соответственно.

Интенсивность дрейфа (D_R) рассчитывают путем умножения плотности дрейфа на расход воды через исследуемое сечение потока за время (t_1, t_2). Наиболее часто интенсивность дрейфа оценивают для 24-часового периода.

Иногда оценивают среднесуточную плотность дрейфа. Для этого показатели интенсивности дрейфа за сутки, рассчитанные для конкретной площади сечения потока, делят на суточный расход воды через данное сечение.

Для сопоставления дрейфа в сообществах из разных рек или в одном и том же сообществе, обитающем в условиях изменяющегося расхода воды, интенсивность дрейфа (D_R) оценивают количеством (D_{RN} , экз./м² в 1 сут) или биомассой (D_{RB} , мг/м² в 1 сут) организмов, сносимых за сутки через сечение потока, с фиксированной шириной, равной, например, 1 м, и высотой, равной глубине участка (h , м) [Богатов, 1984б, 1985, 2005]. Таким образом, если гидрологический режим реки в период наблюдений меняется, то соответственно меняется и глубина исследуемого сечения потока. Принимается, что с помощью данного показателя оценивается численность (биомасса) организмов, пронесенных над 1 м² поверхности грунта. Наиболее важный момент оценки бентостока предложенным способом заключается в том, что он дает возможность рассчитать *удельный дрейфт* (D_C) (*specific drift rate*), позволяющий соотнести дрейфт гидробионтов и их плотность (численность или биомассу) на единице площади грунта. В этом случае:

$$D_{CN} = D_{RN} / N, \text{ а } D_{CB} = D_{RB} / B,$$

где D_{CN} и D_{CB} – удельный дрейфт гидробионтов, учитывающий соответственно их численность (N) и биомассу (B) на площади дна, равной 1 м².*

Поскольку D_{RN} и D_{RB} оцениваются за сутки, то размерности D_{CN} и D_{CB} будут составлять сутки⁻¹ [экз.(г)/м²/сут: экз.(г)/м² = сут⁻¹]. Фактически, данный параметр показывает, в каких соотношениях находится численность (биомасса) организмов, пронесенных в течение суток над 1 м² площади грунта, к их численности (биомассе) на 1 м² площади дна.

В процессе дрейфа происходит перераспределение продукции речных гидробионтов в продольном профиле реки. Оценка взаимосвязи дрейфа и продукции речных бентосных беспозвоночных до последнего времени являлась одной из наиболее сложных методических проблем речной гидробиологии. Для исследования подобного рода зависимостей было предложено использовать безразмерный D/P -коэффициент, который обычно учитывает соотношение суточной интенсивности дрейфа над 1 м² площади грунта (D_{RB}) и продукцию гидробионтов за сутки на 1 м² площади грунта (P_{sd}) [Богатов, 2005]:

$$D/P = D_{RB} \text{ (мг/м}^2 \times \text{сут}^{-1}\text{)} : P_{sd} \text{ (мг/м}^2 \times \text{сут}^{-1}\text{)}.$$

* В работе Богатова [1984б] удельный дрейфт гидробионтов интерпретировался в виде гипотетической минимально возможной дистанции их дрейфа ($L_{\min}$), которая достигается при условии, если в миграциях принимают участие все особи популяции.

Однако использование данного параметра затруднено из-за высокой доли ошибки, неизбежно возникающей при сопоставлении относительно малых расчетных величин P_{sd} и измеренных в природе относительно высоких значений D_{RB} (особенно, если в дрефте участвуют единичные крупные гидробионты). Кроме того, расчет D/P -коэффициента не дает возможность оценить реальное значение дрефта в процессах биологического продуцирования в реках при условии, если величину дрефта на определенном створе мы будем рассматривать как итоговый результат распределения продукции на всем вышерасположенном участке водотока [Богатов, 1994]. В этом случае возникает необходимость оценивать дрефт гидробионтов не в определенной «точке», а через все сечение потока и сопоставлять его с продукцией организмов, обитающих на всем протяжении реки выше створа наблюдения:

$$C_d = (D_d/P_{rd}) 100 \%,$$

где C_d – доля суточной продукции организмов в %, изымаемая с вышележащего участка водотока за счет их дрефта; D_d – биомасса организмов, снесенных через сечение реки за сутки в пункте наблюдения, а P_{rd} – суточная продукция организмов на грунте выше пункта наблюдения [Богатов, 1984б].

Поскольку дрефт речных организмов – процесс динамичный, наиболее полная картина оценки роли дрефта в перераспределении продукции речного бентоса может быть получена при расчете не суточных, а суммарных за вегетационный сезон (год) показателей удаляемой за счет дрефта продукции (C_y , %). Тогда:

$$C_y = (D_y/P_y) 100 \%,$$

где D_y – суммарная за год биомасса организмов, снесенных через сечение реки в районе пункта наблюдения; P_y – годовая продукция организмов на грунте выше створа наблюдения.

Очевидно, что для оценки величины перераспределения продукции беспозвоночных, находящихся на участке, ограниченном двумя створами, необходимо знать величину биомассы мигрирующих гидробионтов на входе в участок и на выходе из него. В этом случае величина изъятия с выделенного участка реки спродуцированной и привнесенной биомассы, например, за год (C'_y , %) будет рассчитываться как

$$C'_y = [(D_{2y} - D_{1y})/P'_y] 100 \%,$$

где D_{1y} и D_{2y} – биомасса организмов, снесенных через сечение реки за год на верхнем и нижнем створах соответственно; P'_y – годовая продукция организмов, обитающих на участке реки между двумя створами. Если $D_{2y} > D_{1y}$, то биомасса исследуемых животных, находящихся внутри изучаемого участка, будет увеличиваться при условии, когда $D_{2y} - D_{1y} < P'_y$; останется неизмен-

ной, если $D_{2y} - D_{1y} = P'_y$, и будет уменьшаться (отрицательный дрейф), когда $D_{2y} - D_{1y} > P'_y$ (без учета выедания хищниками). Однако в практике встречаются ситуации, когда $D_{2y} < D_{1y}$, т.е. прирост биомассы на участке может происходить не только за счет прироста массы обитающих здесь гидробионтов, но и за счет более интенсивного дрейфа организмов с верхних участков реки (положительный дрейф). При этом C'_y будет иметь отрицательные значения и показывать долю прироста биомассы гидробионтов на участке наблюдения за счет дрейфа (т.е. при более высокой интенсивности дрейфа на верхнем створе).

Расчет интенсивности дрейфа через сечение потока с фиксированной шириной, равной 1 м, и высотой, равной глубине участка (h , м), имеет еще одну важную особенность. Именно в этом случае независимо от глубины потока, расходов и скорости течения воды показатели дрейфа D_{RN} или D_{RB} будут представлять собой результат произведения двух параметров: средней дистанции дрейфа гидробионтов (L_D , м) и их суточной миграционной активности (M), измеряемой плотностью (M_N , экз./м³) или биомассой (M_B , мг/м³) организмов, которые в течение суток поднимаются с 1 м² площади грунта в толщу воды объемом 1 м² × h [Богатов, 1984б; Bogatov et al., 1995]. С учетом того, что измеренные значения D_{RN} или D_{RB} можно представить в виде произведений соответственно $D_{RN} = M_N \times L_D$ или $D_{RB} = M_B \times L_D$, появляется возможность оценить значения M_N , M_B или L_D , если один из этих параметров определен. Например, если известными методами [Elliott, 1971; McLay, 1970; Waters, 1965; Богатов, 1979, 1985] установлена дистанция дрейфа, то миграционная активность оценивается как: $M_N = D_{RN} : L_D$ или $M_B = D_{RB} : L_D$. И наоборот, если нам удалось определить миграционную активность, то дистанция дрейфа рассчитывается как: $L_D = D_{RN} : M_N$ или $L_D = D_{RB} : M_B$.

Рассмотрим пример расчета величины дрейфа D_{RN} для двух участков рек, имеющих глубины, равные соответственно 0,1 и 1 м. Примем, что плотность гидробионтов на грунте в обоих случаях составляет 10 экз./м², при этом в течение суток в толщу воды над 1 м² грунта поднимается половина организмов, т.е. $M_N = 5$ экз./м³ в 1 сут, а их средняя дистанция дрейфа составляет 10 м. Величину D_{RN} находим умножением M_N на L_D (5 экз./м³ в 1 сут × 10 м = 50 экз./м² в 1 сут). В результате D_{RN} на каждом из модельных участков составит по 50 экз. организмов, снесенных за 1 сут через сечения 1 м × 0,1 м и 1 м × 1 м соответственно. Понятно, что если бы мигранты в толще воды были распределены равномерно, то плотность их дрейфа, рассчитанная на единицу объема воды, или интенсивность дрейфа, рассчитанная через фиксированную площадь сечения потока, на участке с глубиной в 0,1 м оказались бы примерно в 10 раз больше, чем на участке с глубиной в 1 м.

Нетрудно рассчитать удельный дрейф гидробионтов с учетом их численности (D_{CN}), который на глубине как 0,1 м, так и 1 м будет одинаков и составит 5 сут⁻¹ (50 экз./м² × сут⁻¹ : 10 экз./м² = 5 сут⁻¹).

2.3. КРУГОВОРОТ ВЕЩЕСТВ И ТРОФИЧЕСКИЕ СВЯЗИ

Потоки энергии и вещества являются основными направлениями исследований на уровне экосистем [Винберг, 1936, 1967; Lindeman, 1942; Ивлев, 1945; Odum, 1957; Алимов, 1989, 2000; Allan, 1995; Kemp, Dodds, 2001; Alimov, 2003; Allan, Castillo, 2007; Dodds, 2006; Dodds et al., 2017; Алимов и др., 2013; Merritt et al., 2017; и др.]. Круговорот веществ в реках происходит во время движения воды, поэтому участвующие в круговороте вещества и организмы переносятся от истоков к устью. Круговорот, тем самым, становится не замкнутым, а открытым [Жадин, 1940].

Биогенные и органические вещества в реку поступают с поверхностным стоком, с грунтовыми и глубинными водами, переносятся с ветром и осадками. Из атмосферы в воду также поступают газы (углекислота и кислород) и минеральные вещества. Наибольшее количество биогенов и органических веществ смывается с водосбора весной с талыми водами и поступает в речные системы в осенний период с листовым опадом. Кроме того, большое количество биогенов переходит в реки с лесных территорий после лесных пожаров, а также с сельскохозяйственных угодий после их вспашки, вноса удобрений, выпаса скота и пр. Отдельной проблемой в последние 2–3 столетия стал сброс в пресные воды хозяйственно-бытовых и промышленных стоков, содержащих не только огромное число биогенных элементов, но и токсических веществ.

Круговорот веществ в речных экосистемах происходит по классической схеме. Минеральные вещества и углекислота усваиваются растительными организмами и бактериями в процессе фотосинтеза и гетеротрофного метаболизма. Органические вещества, как продуцируемые на месте, так и транспортируемые, поглощаются микроорганизмами, растениями и животными, обитающими на дне и в толще воды. Органические вещества, накапливающиеся в растениях и беспозвоночных животных, идут в пищу рыбам. Одновременно происходит процесс минерализации неиспользованных органических веществ, продуктов жизнедеятельности водных организмов различных категорий и трупов погибающих животных и растений. В этом мощном процессе ведущая роль принадлежит бактериям и грибам. Продукты, создаваемые в процессе круговорота веществ в реке, лишь частично аккумулируются на месте – в организмах бентоса и перифитона, а иногда и в виде донных отложений; большая же часть их сносится вниз вместе с неиспользованными биогенными веществами. Некоторая часть веществ и организмов вовсе выпадает из круговорота, путем осаждения в пойме в период половодья, выходом в атмосферу продуктов редукации (азота, метана, кислорода, углекислоты), вылетом водных насекомых, выловом рыб и беспозвоночных, сбором растений [Жадин, Герд, 1961].

2.3.1. Концепции спиралеобразного движения питательных веществ в реке

Еще в 30-х годах прошлого столетия Жадин [1940] выдвинул концепцию спиралеобразного движения питательных веществ в реке. Наложив схему круговорота веществ в реке на схему ее продольного профиля, он получил картину поступательного движения веществ и организмов вниз по реке в виде спирали (рис. 2.39). Причем витки спирали на плесах и перекатах по Жадину имели различную форму: на плесах у спирали был утолщенный нижний отрезок, указывающий, что здесь происходит местная аккумуляция органического вещества, а на перекатах виток отличался малыми размерами и отсутствием какого-либо утолщения, свидетельствующими, что течение быстро переносит вещества и организмы, не допуская какой-либо их аккумуляции на дне [Жадин, 1940; Жадин, Герд, 1961].

Очевидно, что концепция Жадина рассматривает частный, хотя и широко распространенный случай оборота веществ, характерный в основном для европейских равнинных или предгорных рек, имеющих песчаный, глинистый или гравийный грунт. На таких водотоках в периоды межени наблюдается заиливание плесов, в то время как на перекатах подобной аккумуляции веществ не наблюдается. В то же время в горных и полугорных реках с каменистым или гравийно-галечным грунтом с валунами перекаты в массе заселяют беспозвоночные-фильтраторы, способные с помощью специальных приспособлений улавливать взвешенные питательные вещества. Например, многие личинки ручейников строят ловчие сети, склеивая ими устилающие дно галечник и валуны. Личинки мошек, в массе покрывающие на перекатах наружную поверхность валунов, закрепляясь на них крючьями заднего конца тела, улавливают

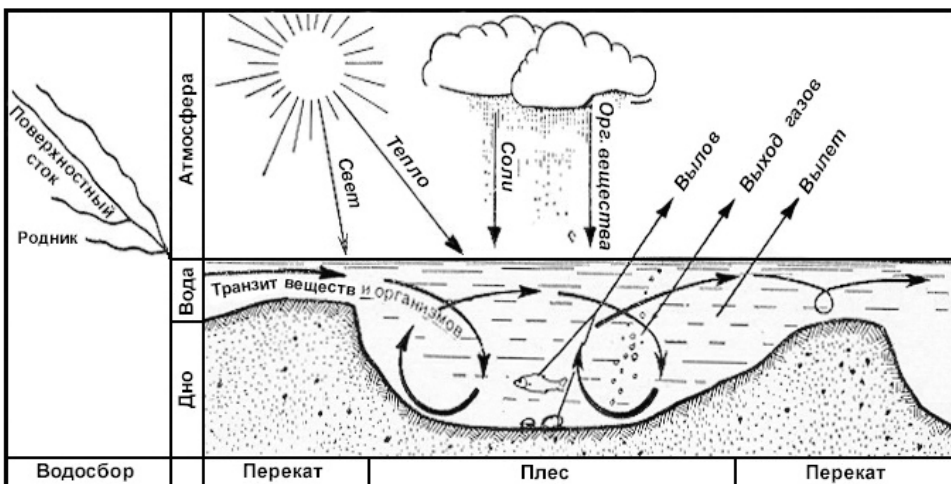


Рис. 2.39. Схема круговорота веществ в реке по Жадину [1940]

органические частицы с помощью больших веерообразных придатков, расположенных в передней части головы. Таким образом, на перекатах беспозвоночные-фильтраторы аккумулируют большое количество органических веществ. Тем не менее на плесах в периоды низкой воды на грунте могут скапливаться продукты жизнедеятельности беспозвоночных и иные органические фрагменты. На подобных слабопроточных участках в течение месяца может накапливаться несколько сантиметров подобного «ила». Такие участки русла становятся малопригодными для жизни многих реофильных гидробионтов. Однако в период даже небольшого дождевого паводка подобные накопления смыываются водным потоком.

В конце 70-х годов прошлого века европейскими исследователями вновь была сформулирована и получила развитие концепция спиралеобразного оборота (спиралинга*) питательных веществ (*nutrient spiraling concept*) [Webster, Patten, 1979; Newbold et al., 1981], в которой, как и в концепции Жадина, речные экосистемы рассматривались в качестве вытянутых в длину транспортных систем. Смысл концепции сводился к тому, что в однонаправленных речных потоках круговорот питательных веществ, точнее, каждый цикл этого круговорота, происходит с пространственным смещением вниз по течению, что приводит к образованию частично открытых циклов (*partially open cycles*) оборота веществ в виде спиралей. Форма и размер спирали каждого цикла являются результатом физического и биологического процессов: смещение цикла вниз по течению – это функция физических процессов, а потребление и ассимиляция питательных веществ – биологических.

Введение пространственного (линейного) измерения в круговорот питательных веществ отражает важные отличительные особенности между ситуациями с потоками веществ, наблюдаемыми в речных экосистемах, по сравнению с большинством других водных и наземных экосистем [Minshall et al., 1983]. Очевидно, что степень смещения цикла определяется мощностью водного потока: т.е. чем более мощный поток, тем должно быть большее расстояние между петлями спирали. В частности, по данным Ньюболда с соавторами [Newbold, Mulholland et al., 1982], полученным на реках I, II и III порядков, дистанция круговорота органического углерода составила 3–5 км. В то же время, в недавней работе Холла с соавторами [Hall et al., 2016], исследовавшими метаболизм экосистем в 14 крупных реках запада и среднего запада США, было установлено, что протяженность углеродного оборота составляла от 38

* Термин «спиралинг» используется для описания комбинированных процессов циркуляции питательных веществ и их линейного движения в проточной воде. Для определения активности «спиралинга» обычно используют величину скорости оборота питательных веществ, определяемую как среднюю или ожидаемую дистанцию, преодоленную веществом (элементом, атомом) по течению реки за промежуток времени между его поступлением или фиксацией в воде и его окислением [Newbold, Mulholland et al., 1982].

до 1190 км, при этом наибольшие обороты наблюдались в реках с высоким уровнем седиментации и в аридных зонах.

Было показано, что скорость оборота питательных веществ в речных экосистемах зависит и от биологической активности биоты, измеряемой, например, метаболизмом бентосного сообщества. В условиях стабильного гидрологического режима в речных экосистемах имеется множество механизмов замедления транспортирующей способности потока. В частности, сообщества в водотоках организованы так, чтобы, с одной стороны, максимизировать использование питательных веществ и энергии на определенных участках русла, с другой – приспособиться к физическим изменениям в речном континууме, поддерживая в продольном профиле реки определенное равновесие по потокам вещества и энергии с окружающей средой [Vannote et al., 1980]. Степень задержания и переиспользования питательных веществ в потоке определяется плотностью спиралей, которая, в свою очередь, может быть измерена как расстояние перемещения питательного вещества вниз по течению от момента его поступления в водную среду в доступном для потребления состоянии, последующим проходом через пищевую цепь и до возвращения в воду в форме, доступной для нового использования (рис. 2.40). Чем короче средняя длина между витками спирали (т.е. чем короче дистанция пробега питательного вещества до его потребления), тем более интенсивно речным сообществом используются питательные вещества. Например, Ньюболд с соавторами [Newbold, Mulholland et al., 1982], исследуя модель круговорота органического углерода

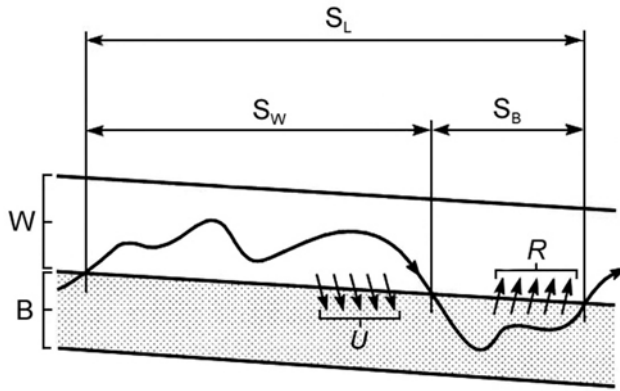


Рис. 2.40. Модель круговорота биогенных элементов в речном потоке.

S_L – общая длина спирали, т.е. среднее расстояние, которое биогенный элемент, например фосфор, преодолевает вниз по течению за один цикл своего оборота. Цикл начинается с пригодности элемента в водной среде (W) к потреблению и включает расстояние его транспортировки в воде (S_W) до потребления (U) и ассимиляции (R) биотой (B). Закачивается цикл минерализацией и повторным поступлением элемента в водную среду безотносительно дистанции его перемещения (S_B) в водном потоке в период ассимиляции.

По: [Allan, 2006], модификация рисунка из: [Newbold, O'Neill et al., 1982]

в соотношении с биомассой и дыханием сообщества, а также поступлением извне, пришли к заключению, что постоянный запас органического углерода в речной системе близок к равновесному состоянию между учтенными переменными на участке, равном примерно пяти средним дистанциям оборота

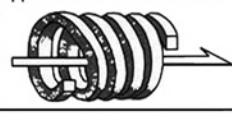
Механизм		Эффективность циклов ПВ		Устойчивость экосистемы *	Порядки изученных рек
Задержание	Биологическая активность	Интенсивность рециркуляции	Дистанция между оборотами спирали		
А. Высокое	Высокая		БЫСТРАЯ	ВЫСОКАЯ	МИ II, III ПА I, II, III
			КОРОТКАЯ		
Б. Высокое	Низкая		МЕДЛЕННАЯ	ВЫСОКАЯ	ОР I, II АД I МИ I
			КОРОТКАЯ		
В. Низкое	Высокая		БЫСТРАЯ	НИЗКАЯ	АД III МИ IV ПА IV
			ДЛИННАЯ		
Г. Низкое	Низкая		МЕДЛЕННАЯ	НИЗКАЯ	ОР III, IV АД II, IV
			ДЛИННАЯ		

Рис. 2.41. Установленные эффекты взаимодействий между дистанцией перемещения питательных веществ (ПВ) вниз по течению и биологической активностью (например, метаболизмом бентосного сообщества) по отношению к циклу (обороту) ПВ в исследованных потоках (штаты: АД – Айдахо, МИ – Мичиган, ОР – Орегон, ПА – Пенсильвания)

В схематическом представлении круговорота ПВ (спиралинга) интенсивность рециркуляции ПВ отражает биологическую активность сообщества. На схеме: чем меньше диаметр петли спирали, тем быстрее происходит рециркуляция ПВ. Расстояние между спиральными петлями обозначает степень смещения цикла ПВ вниз по течению однонаправленным потоком воды. Эффективность переноса ПВ потоком может быть возмещена механизмами его задержки (перехвата биотой) и вовлечением в цикл биотического оборота так, что, чем выше степень задержки ПВ, тем короче расстояние между петлями (т.е. тем более близко заканчивается цикл оборота ПВ в любом пункте потока). Количество ПВ, задействованное в цикле, представлено толщиной спиральной линии. Из: [Minshall et al., 1983].

* В первоисточнике применено словосочетание «ecosystem stability», которое в специальной литературе обычно переводится на русский язык как «устойчивость экосистемы». В данном случае понятие «ecosystem stability» обозначает «устойчивость» (в русскоязычной интерпретации) по Риклефсу, т.е. «внутренне присущую системе способность выдерживать изменение, вызванное извне, или восстанавливаться после него» [Риклефс, 1979, с. 379], что близко к понятию «выносливости» по Алимову [2000].

этого элемента. Таким образом, чем короче дистанция оборота углерода, тем меньше требовалось продольного участка реки для достижения состояния равновесия этого элемента в экосистеме.

По частоте циклов питательных веществ и уровню биологической активности выделяют четыре группы сообществ [Minshall et al., 1983]: эффективность оборота питательных веществ может быть высокой или низкой как при высокой, так и при низкой биологической активности сообществ (рис. 2.41). При этом наибольшая плотность спиралей (т.е. высокая интенсивность оборота питательных веществ) оказалась характерна для водотоков низких порядков. Эффективность переноса питательных веществ потоком может быть возмещена механизмами его задержки (перехвата биотой) и вовлечением в цикл биотического оборота так, что, чем выше степень задержки питательных веществ, тем короче расстояние между петлями (т.е. ближе заканчивается цикл оборота питательных веществ в любом пункте потока).

В последние годы некоторые принципы концепции спиралинга питательных веществ подвергаются уточнению. В частности, указывается, что основные положения этой концепции были разработаны для основного русла реки без учета значимости и возможности циклов оборота питательных веществ в разнообразных боковых, т.е. прибрежных речных зонах [Thorp et al., 2008]. Оказалось, что некоторые боковые участки рек способны эффективно сжимать питательные спирали, более эффективно задерживать азот и другие биогенные элементы, а в слабопроточных прибрежных участках получают развитие процессы нитрификации и денитрификации [Thorp et al., 2008]. Наконец, геоморфологически сложные прибрежные функциональные зоны имеют большее отношение длины береговой линии к продольной оси потока, что повышает значимость прибрежных участков (в случаях сильной изрезанности береговой линии) в обороте питательных веществ, по сравнению со стрежнем реки.

2.3.2. Аллохтонное органическое вещество

На важную роль аллохтонного органического вещества в круговороте питательных веществ в водоемах указывал еще Зернов [1934]. Тем не менее вплоть до середины 1970-х годов наземные растения не принимались во внимание в качестве серьезного источника энергии для речных сообществ [Cushing, Allan, 2001]. Лишь после публикации статьи Хайнса [Hynes, 1975], посвященной энергетическим ресурсам водотоков, включающим как водные, так и наземные источники, пришло осознание, что, по крайней мере, в лесных районах речные экосистемы имеют гетеротрофный тип метаболизма, при этом аллохтонное органическое вещество (листовой опад, плоды, пыльца, древесные фрагменты и пр.) в энергетических потоках может быть доминирующим.

Стало очевидно, что в верховьях рек большинство первичных консументов питаются в основном листовым опадом и связанными с ним бактериями. В связи с этим беспозвоночные здесь представлены так называемыми механическими измельчителями опада (*large particulate shredders*) и сборщиками детрита (*collectors*). Для последующего изучения динамики детрита в реках было предложено использовать разделение мертвого органического вещества на размерные классы: грубые частицы органического вещества с размером макрочастиц >1 мм (*coarse particulate organic matter* – CPOM); мелкие частицы органического вещества с размером частиц соответственно от 1 мм до $0,5\text{ }\mu\text{m}$ (*fine particulate organic matter* – FPOM) [Cummins, 1974]*.

Было отмечено, что поступающий в ручьи и реки листовой опад и другая аллохтонная органика включаются в круговорот и частично сносятся вниз по течению. Причем, например, в ручьях Центральной Европы с листовым опадом поступает до 98 % органического вещества [Caspers, Wagner, 1980]. Примерную схему трансформации осенних листьев в реке, как основного поставщика CPOM, можно продемонстрировать в виде трех основных этапов (рис. 2.42). На первом этапе попавшие в водоток листья намокают, из них активно вымываются растворимые органические (*dissolved organic matter* – DOM) и неорганические компоненты. Причем в первые 24 ч вследствие вымывания теряется до 25 % от исходной сухой массы листьев [Webster, Benfield, 1986]**.

Листья различных древесных растений показывают видоспецифичные особенности на выщелачивание. Например, ольха теряет лишь около 4 % от сухой массы, в то время как клен и вяз – около 16 %. При этом листья с высокой начальной концентрацией питательных веществ распадаются быстрее, чем листья с их низким содержанием [Kaushik, Hynes, 1971]. На втором этапе происходит колонизация листа грибами и колониями бактерий, в результате состояние листьев заметно изменяется. Мицелии грибов проникают в листья, смягчают их и, в совокупности с бактериями, обогащают листовой опад питательными веществами. В этот период отмечено возрастание доли азота по отношению к сухой массе листа, что связывают с увеличением микробной биомассы и соответственно включением азота из окружающей среды в новый белок [Allan, 2006].

* Размер фракций FROM в свою очередь разделяют на категории среднетонких ($250\text{--}1000\text{ }\mu\text{m}$), небольших ($100\text{--}250\text{ }\mu\text{m}$), тонких ($45\text{--}100\text{ }\mu\text{m}$), очень тонких ($25\text{--}45\text{ }\mu\text{m}$) и ультратонких ($0,45\text{--}25\text{ }\mu\text{m}$) частиц. Взвешенный мелкодисперсный материал принято называть сестоном, который включает в себя все живые организмы (бактерии, водоросли, простейшие, беспозвоночные и т.д.) и неживой материал (аморфное органическое вещество, детрит, а также взвешенный неорганический осадок) в диапазоне размеров от $0,45\text{ }\mu\text{m}$ до 1 мм [Wallace et al., 2006].

** Количество растворимых органических компонентов, попавших в поток, зависит также от предварительного выщелачивания листьев дождем, когда листья находятся еще на деревьях и особенно в подстилке.

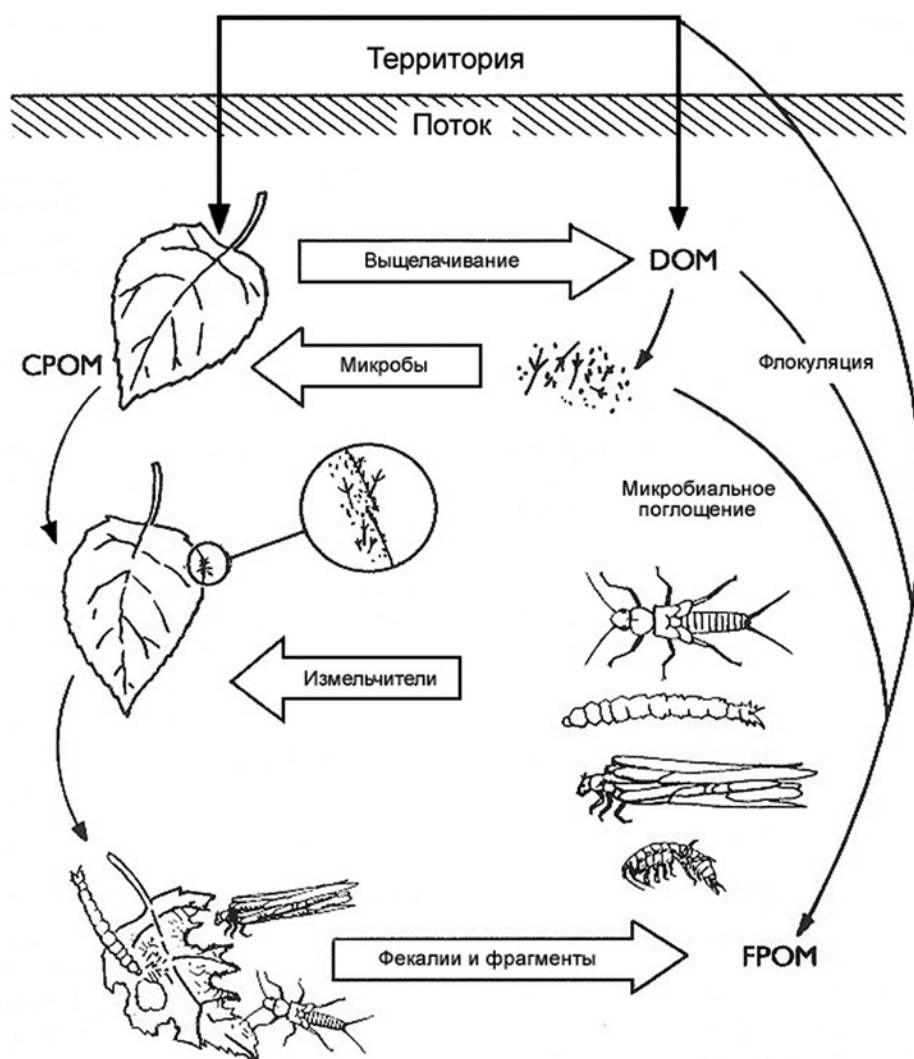


Рис. 2.42. Схема связей между измельчителями, СПОМ и микроорганизмами в небольшом ручье в пределах широколиственного леса. Механическое разрушение, микробная активность (особенно грибов) и беспозвоночные измельчители превращают основную часть СПОМ в более мелкие частицы. При химическом выщелачивании, микробной экскреции и дыхании выделяются DOM и CO_2 , но подавляющая часть исходного углерода поступает на грунт в виде фрагментированного материала и фекалий. Из: [Cummins, Klug, 1979]

Третья стадия трансформации листьев включает их фрагментацию за счет механического распада и деятельности беспозвоночных. Благодаря сочетанию смачивания, физического износа, микробной колонизации и измельчению беспозвоночными, СПОМ на заключительной стадии модификации листьев преобразуется в FPOM. Эти частицы, обогащенные питательными веществами,

доступны для дальнейшей колонизации микроорганизмами и способны служить кормом для большой группы беспозвоночных, которые собирают FPOM с грунта или фильтруют его из водного потока.

Оценку динамики аллохтонного органического вещества в экосистемах ручьев и рек удобно проследить при исследовании CPOM или FPOM в сестоне. При этом было показано, что особую роль в динамике взвешенных органических частиц играет гидрологический режим водотока. В частности, наблюдения, проведенные в июне 1986 г. в ритрале р. Кедровая (юг Приморского края), показали, что в весенне-летний меженный период доля CPOM в сестоне не превышала 40 %. Однако в период даже кратковременного паводка средней силы (подъем воды составил чуть более 0,5 м) русло реки уже в первые часы подъема воды освобождалось от водорослевых обрастаний грунта. На пике паводка масса сносимого CPOM через 1 м² потока увеличилась почти в 6 тыс. раз по сравнению с предпаводковым периодом и составила около 160 кг сухой массы за 1 ч (рис. 2.43). Отметим, что паводковыми водами лиственный опад вымывается не только из русла реки, но и с затопленных паводком прибрежных участков рек.

В условиях широколиственных лесов в осенний период в зонах кренали и ритрале листовым опадом заполняются плесы и ямы. Из опавших листьев в водотоках могут формироваться плотные «пакеты», значительная часть листвы задерживается среди древесных заломов, между крупными камнями. Большое количество органики может также скапливаться в ложе реки при

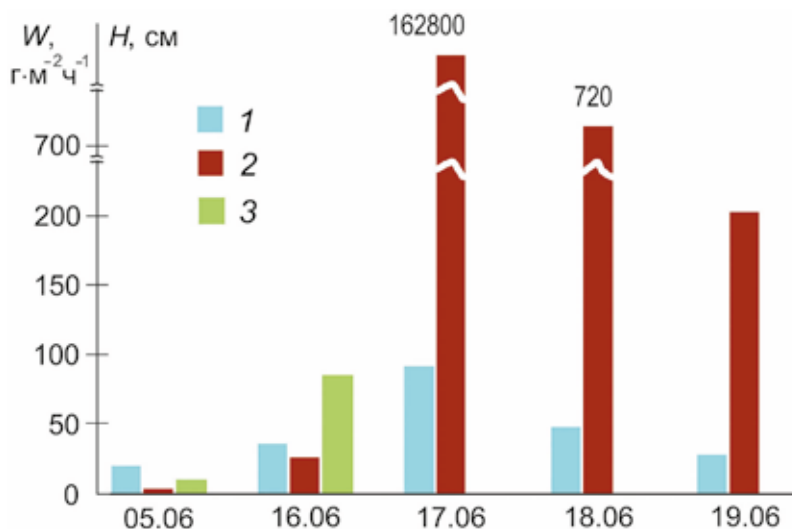


Рис. 2.43. Уровень воды (H , см), снос CPOM и автохтонного органического вещества (W , г сухой массы через 1 м² сечения потока за 1 ч) в р. Кедровая в июне 1986 г. (1 – уровень воды, 2 – CPOM, 3 – автохтонное органическое вещество). По материалам В. Богатова [1994]

пересыхании русел рек в меженные периоды. В лесных местностях речные экосистемы к началу зимнего сезона аккумулируют громадное количество аллохтонной органики. Именно в этот период формируется трофическая структура сообществ зообентоса, определяющая его облик в очередном вегетационном сезоне. В то же время в последние годы в некоторых регионах, в том числе на юге Дальнего Востока России, все чаще стали отмечаться поздне-осенние паводки, что, по-видимому, связано с глобальными изменениями климата [Bogatov, Fedorovskiy, 2016]. В результате осенние накопления листового опада еще до ледостава выносятся из экосистем верховьев рек (рис. 2.44). В результате перед началом нового вегетационного сезона в речных системах при



Рис. 2.44. Верховья р. Комаровка: 1 – ноябрь 2014 г. после завершения листопада; 2 – ноябрь 2015 г., то же место после позднеосеннего паводка. Фото В. Богатова

практически полном отсутствии СРОМ происходит формирование иной трофической структуры донного сообщества. Например, по нашим наблюдениям, проведенным в ритрале р. Комаровка в 2014–2016 гг., после позднеосеннего паводка 2015 г. в вегетационном сезоне 2016 г., средняя за сезон биомасса измельчителей (*Gammarus*, личинки *Pteronarcys*) и собирателей детрита (личинки *Baetis*) резко снизилась, в то время как доля соскребателей перифитона (личинки *Glossosoma*, некоторые *Heptageniidae*) и хищников (личинки *Kamimuria*) увеличилась [Bogotov, 2017].

2.3.3. Трофические уровни и функциональные группы

Функциональная роль организмов в реке, благодаря жизнедеятельности которых формируются потоки вещества и энергии в экосистемах, в значительной степени основывается на использовании пищевых ресурсов. Разработанная Линдеманом [Lindeman, 1942] концепция трофических уровней в экосистемах находится в полном соответствии с положениями о балансе веществ и энергии в водоемах. Любой вид не только приспособлен к определенным источникам питания, но и сам служит пищевым ресурсом для других. Пищевые взаимосвязи создают в природе трофическую цепь. Число выделяемых трофических уровней в пищевых цепях определяется сложностью трофических взаимоотношений организмов в экосистеме и степенью наших знаний о пищевых спектрах конкретных гидробионтов [Алимов, 1989]. На каждом трофическом уровне происходит рассеивание энергии при переходе с одного трофического уровня на другой. Рассеивание энергии может достигать 90 %, что не позволяет ожидать в экологических системах большого числа трофических уровней (число звеньев обычно не превышает 4–5).

Говоря о пищевых взаимосвязях в речных экосистемах, нельзя забывать, что некоторые гидробионты играют важную роль не только в речных, но и в прибрежных пищевых сетях, являясь заметной составляющей рациона многих наземных животных. В частности, идущими на нерест лососевыми рыбами активно питаются медведи, а вылетающими имаго водных насекомых – летучие мыши, птицы, пауки и др. Значение имаго водных насекомых для поддержания численности летучих мышей и птиц было наглядно продемонстрировано Кеннеди с соавторами [Kennedy et al., 2016], изучившими влияние резких изменений уровня воды в Гранд-Каньоне (р. Колорадо) при эксплуатации гидросооружений на жизненные циклы поденок, веснянок и ручейников, обитание которых приурочено к мелководьям. Было показано, что при резких колебаниях уровня воды погибают яйцекладки этих насекомых, что влечет за собой исчезновение и самих насекомых из речной экосистемы. В результате уменьшается рыбное население реки, снижается численность птиц и летучих мышей (рис. 2.45).

Речные пищевые цепи можно разделить на два основных типа: пастбищную и детритную. В наиболее общем виде в состав трофических уровней пастбищной пищевой цепи входят автотрофные организмы, которые занимают первый трофический уровень (продуценты), растительноядные животные, занимающие второй трофический уровень (консументы первого порядка), хищники, питающиеся растительноядными животными и занимающие третий уровень (консументы второго порядка), вторичные хищники – четвертый трофический уровень (консументы третьего порядка) и т.п. Детритные пищевые цепи начинаются с мертвого органического вещества (растительные и животные остатки – первый трофический уровень), которое в результате деятельности микроорганизмов (редуцентов) переводится в детрит. В речных экосистемах

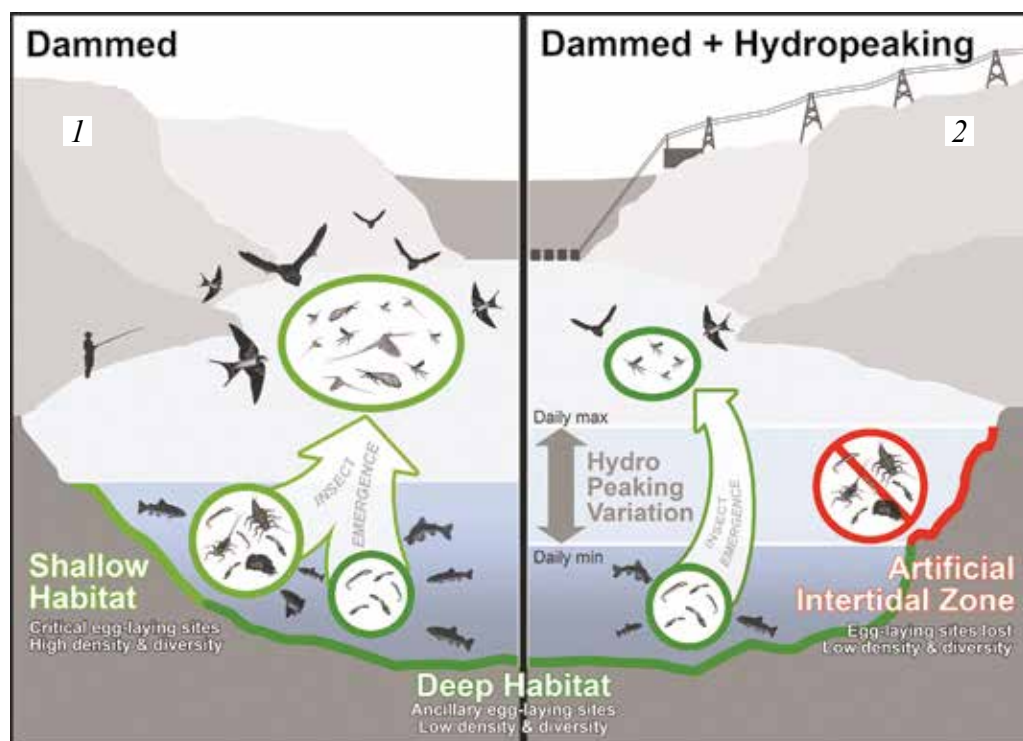


Рис. 2.45. Прибрежные пищевые цепи в Гранд-Каньоне (р. Колорадо) ниже плотины при разном режиме колебания уровня воды. 1 – прибрежная пищевая цепь ниже плотины при стабильном уровне воды, способствующем выживанию яйцекладок личинок амфибиотических насекомых, обитающих в мелководной зоне реки, что обеспечивает их высокую плотность и разнообразие; 2 – редуцированная прибрежная пищевая цепь в условиях резких колебаний уровня воды: в искусственной приливно-отливной зоне происходит гибель кладок амфибиотических насекомых, в результате чего плотность и разнообразие сообществ насекомых в мелководной зоне реки резко снижаются, а прибрежная пищевая цепь редуцируется. Из: [Kennedy et al., 2016]

наиболее распространенными детритофагами являются личинки водных насекомых и ракообразные. Детритофаги сами служат пищей для хищных беспозвоночных и рыб. Детритные цепи наиболее характерны для сообществ верхних участков речных экосистем лесной зоны, где многие организмы питаются попавшим в водоток листовым опадом.

Более детальная трофическая классификация реофильных организмов обычно проводится на основе категории потребляемой пищи, источники которой в речных экосистемах разнообразны: водоросли и макрофиты, грубое (CPOM), тонкое (FPOM) и растворенное (DOM) органическое вещество, а также биопленка [Cushing, Allan, 2001]. Кроме того, при трофической классификации водных животных учитывается способ добывания пищи. Например, одни беспозвоночные могут потреблять FPOM, собирая органические частицы с грунта, другие – фильтруя их из толщи воды.

Напомним, что к основным пищевым функциональным группам, структуру которых предложил Камминс для водных насекомых [Cummins, 1973], относятся измельчители (*shredders*), пасущиеся беспозвоночные или соскребаатели перифитона (*periphyton grazers/scrapers*), коллекторы детрита (*collectors*), которые, в свою очередь, подразделяются на собирателей (*gathers*) и фильтраторов (*filters*), а также хищники (*predators*). Имеются и другие категории специализированных по питанию организмов, которые в данной работе не рассматриваются. Трофические связи между функциональными группами речных беспозвоночных показаны на сетевой диаграмме, которая обеспечивает представления о направлениях трансформации пищевых ресурсов и энергии в речном сообществе (рис. 2.46).

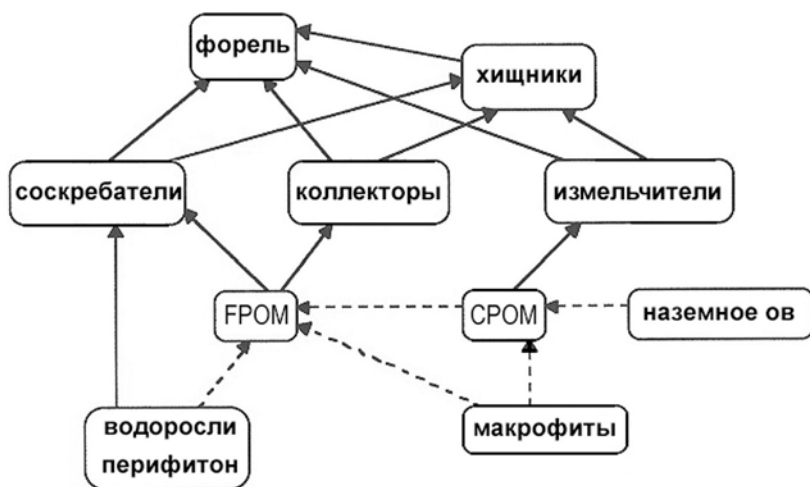


Рис. 2.46. Диаграмма пищевых взаимосвязей в речных экосистемах. Сплошные стрелки показывают направление пищевых потоков, пунктирные – пути трансформации органических веществ (ОВ). Из: [Cushing, Allan, 2001]

Измельчители являются важнейшей функциональной группой в реках лесной зоны. Эти беспозвоночные способны во время питания измельчать крупные частицы органического вещества (СРОМ), получая при этом питательные вещества и энергию как от самого листа, так и от микроорганизмов, в первую очередь грибов, которые колонизируют листья. В процессе питания измельчители механически переводят СРОМ в FРОМ, а также производят FРОМ в виде фекальных шариков. Измельчители развиваются в основном на участках, где скапливается листовая опад. В то же время для жизнедеятельности сообществ измельчителей требуются биотопы с насыщенной кислородом водой [Cushing, Allan, 2001]. Поэтому на участках с большим скоплением листьев, во внутренних слоях которых отмечается недостаток кислорода, измельчители могут функционировать только в поверхностном слое опада. Среди типичных представителей данной трофической группы можно отметить амфипод из рода *Gammarus* (*G. pulex*, *G. lacustris*, *G. coreanus* и пр.), личинок долгоножек (Tipulidae), веснянок из рода *Pteronarcys*, ручейников (Limnephilidae) и др. Следует также помнить, что амфиподы и некоторые другие ракообразные играют ключевую роль при переработке мертвых тел лососевых рыб после их нереста.

Другая функциональная группа беспозвоночных носит двойное название – пасущиеся, или соскребатели. Ее представители обитают на тех участках каменистых и иных крупных субстратов, где развиваются водорослевые обрастания. Ротовые органы этих беспозвоночных приспособлены для соскабливания пленки водорослей или перифитона, в том числе грубых диатомовых водорослей, которые очень плотно прилегают к каменным поверхностям. К таким беспозвоночным относятся личинки ручейников из родов *Glossosoma*, *Helicopsyche*, *Neophylax*, *Psephenus*, *Dicosmoecus* и др. [Merritt, Cummins, 1996]. Кроме того, крупные личинки ручейников из рода *Dicosmoecus* при выскабливании пленки водорослей способны заглатывать частицы СРОМ или мелких личинок мошек. Многие «плоские» личинки поденок, тело которых уплощено в дорсо-вентральном направлении (большинство Heptageniidae), потребляют водоросли, которые не так жестко прикреплены к субстрату. При питании соскребатели производят многочисленные фекальные шарики, а также переводят некоторые клетки водорослей в водный поток [Cushing, Allan, 2001].

Еще одна большая функциональная группа, представленная коллекторами, дополнительно делится на две подгруппы – фильтраторов и сборщиков. Обе подгруппы в основном питаются FРОМ. При этом фильтраторы получают пищу путем фильтрации FРОМ из воды либо при помощи специально сплетенных тонких сетей или камер, либо адаптированными к фильтрации частями тела (рис. 2.47). К сетевязальным фильтраторам относятся, например, свободноживущие личинки ручейников Hydropsychidae, а к организмам, имеющим специальные органы для фильтрации, – личинки мошек, ручейников из рода *Brachycentrus*, поденок из рода *Isonychia* и др.

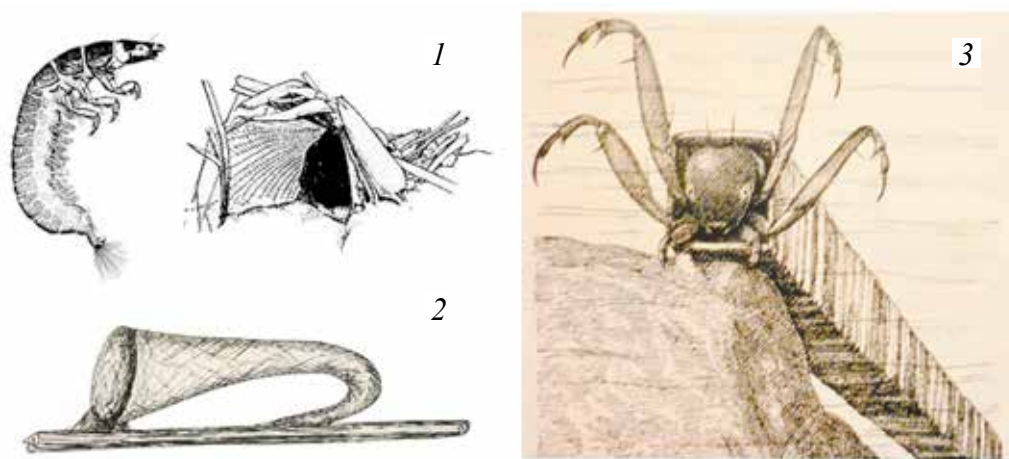


Рис. 2.47. Личинка Hydropsychidae с ловчей сетью (1), из: [Merritt, Cummins, 1996]; ловчая камера личинки *Neureclipsis* (2), из: [Ross, 1944]; личинка *Brachycentrus* в позиции отлова частиц и организмов сестона (3), из: [Cushing, Allan, 2001]

Коллекторы-сборщики, как следует из их названия, собирают пищу в зонах с замедленным течением, где происходит осаждение FPOM, на поверхности камней или под камнями, среди обломков деревьев, в других затишных участках. Наиболее распространенными беспозвоночными этой группы организмов считаются личинки поденок из рода *Baetis*. Некоторые роющие нимфы (семейства Ephemeridae, Polyniitarsiidae, Palingeniidae) живут в илу и питаются органическими частицами во время рытья ходов.

Замыкающая функциональная группа беспозвоночных ведет хищный образ жизни, охотясь на других водных обитателей (рис. 2.48). Среди бентосных организмов к хищникам относится большинство личинок веснянок, стрекоз (Odonata), личинки вислоккрылок (Megaloptera), жуков-плавунцов (Dytiscidae), ручейников из семейства Rhyacophyladae и др. Эти беспозвоночные обитают в разных биотопах и имеют много специфичных приспособлений для захвата добычи. Например, личинки вислоккрылок имеют выдвинутые вперед длинные серповидные жвалы с заостренными концами, с помощью которых происходит захват беспозвоночных, головастика или рыб, размеры которых могут превышать размеры самой личинки (рис. 2.48, 1). У личинок стрекоз имеется сильно удлинённая нижняя губа, образующая хватательный орган – маску. При захвате добычи она выбрасывается вперед (рис. 2.48, 2), в покое – прикрывает голову снизу и/или с боков. У личинки жука-плавунца нет рта, однако имеются две саблевидные челюсти – мандибулы (рис. 2.48, 3), внутри которых протекает канал, ведущий в ротовую полость. Личинка бросается на жертву и через челюсти взбрызгивает отравляющий состав из своего желудка (рис. 2.48, 4). Яд убивает жертву, и личинка через те же челюсти всасывает внутреннее содержимое

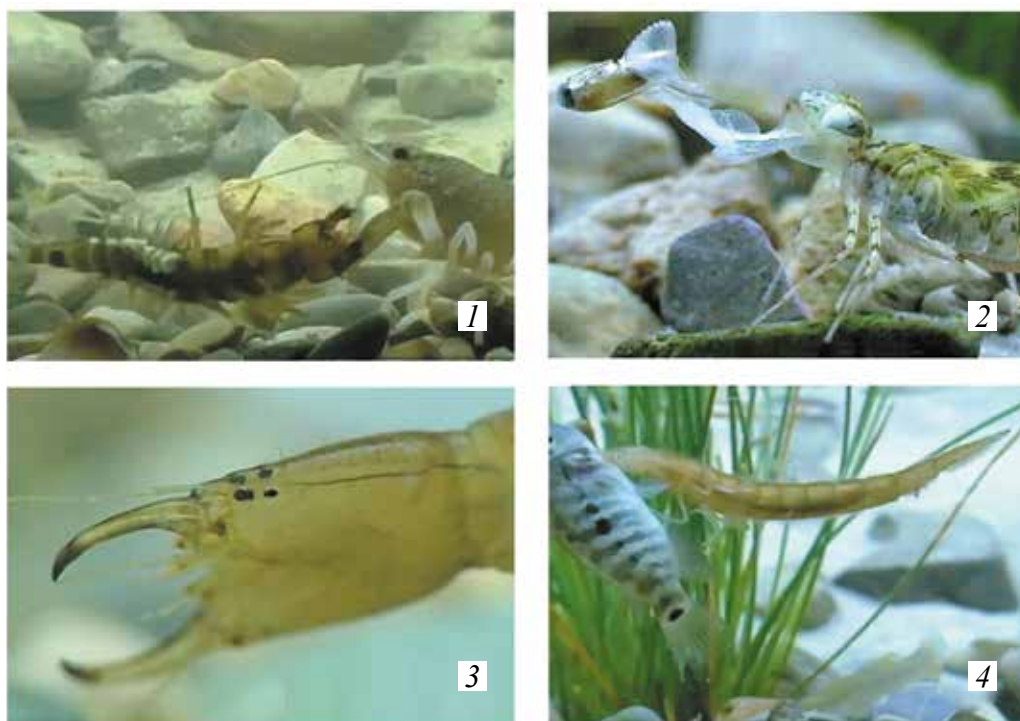


Рис. 2.48. Личинка вислокрылки атакует речного рака (1), личинка стрекозы захватывает водяного клопа (2), голова личинки жука-плавунца (3), личинка жука-плавунца нападает на рыбу (4). Кадры видеофильмов из сайта <https://www.youtube.com/>

своей добычи, которое переваривается под действием желудочного яда. От жертвы остается только внешняя оболочка.

Мирные и хищные беспозвоночные в свою очередь охотно поедаются рыбами. Причем большую часть беспозвоночных рыбы поедают во время дрейфа донных организмов. Кроме того, скат молоди проходных лососевых рыб обычно совпадает с периодом максимальной интенсивности бентостока [Леванидова, Леванидов, 1962], вследствие чего донные организмы могут выполнять роль «буфера», смягчающего выедание мальков другими хищными рыбами. Известно, что хищники, находясь на вершине пищевой пирамиды, играют ключевую роль в формировании видового разнообразия сообществ животных. Они могут изымать отдельные виды или поддерживать низкий уровень их численности, что приводит к снижению интенсивности межвидовой конкуренции и повышению видового разнообразия, которое может оказаться даже большим, чем в сообществах с низкой конкуренцией [Алимов, 2016].

Соотношение различных трофических групп зависит от гидрологических характеристик водотока и его широтного положения. В частности, в специальном исследовании Тиуновой [2006] было замечено, что в метаритрали малых

рек умеренно-холодноводного типа по биомассе доминируют фильтрующие коллекторы, холодноводного типа – коллекторы и соскребатели, умеренно тепловодного типа – хищники-соскребатели и соскребатели. В ритроне рек юга Дальнего Востока России наблюдалось закономерное уменьшение числа хищников с юга на север. Здесь следует отметить, что наличие хищных беспозвоночных в речной экосистеме указывает не только на развитые пищевые связи в сообществах, но и на качество пресных вод, поскольку известно, что уже на начальном этапе антропогенного загрязнения из водной экосистемы в первую очередь исчезают хищные животные, что приводит к сокращению трофических цепей и упрощению трофических связей. Причем в реках, подверженных антропогенному загрязнению, внутри оставшихся трофических групп происходят изменения как в качественном составе, так и в соотношении отдельных представителей.

2.3.4. Динамика трофических сетей

Считается, что целостность экологических систем образуется в основном за счет взаимодействия организмов разного трофического уровня. Неслучайно Алимов [1989] определяет биоценоз, как «систему, состоящую из популяций животных разных видов, локализованную в пространстве и времени и характеризующуюся некоторой внутренней структурой и взаимосвязями между популяциями входящих в нее видов, среди которых наиболее значимы трофические» [Алимов, 1989, с. 81]. Как отмечает Алимов, «концепция трофических уровней позволила рассматривать процессы потребления, продуцирования, деструкции в экосистемах в их взаимосвязи. Однако она дает возможность получения лишь очень обобщенных и приближенных представлений о трофодинамике в экосистемах... Более строго можно описать и проанализировать картину трофических взаимоотношений в экосистемах, используя представление о трофических сетях, т.е. о более разветвленной по сравнению с трофическими уровнями системе пищевых связей» [Алимов, 1989, с. 9].

В реальных экосистемах, включающих многочисленные виды организмов, формируется большое количество трофических цепей, причем некоторые виды или их размерные группы одновременно могут быть представлены в нескольких цепях, т.е. отдельные участки разных трофических цепей могут образовывать общие трофические уровни. Комбинации разных трофических цепей, имеющих общие трофические уровни в экосистеме, называют *трофическими сетями*. Соотношение моделей трофических цепей (условное распределение организмов по трофическим уровням) и трофических сетей (распределение организмов по трофическим предпочтениям/спектрам) в речной экосистеме наглядно продемонстрировано Торпом с соавторами [Thorp et al., 2008] по оригинальным материалам, полученным из разных источников (рис. 2.49). В отличие

от концепции трофических уровней, которая основана на упрощенной модели трофического распределения организмов, в моделях трофических сетей учитываются разные спектры питания консументов, которые потребляют пищу на разных уровнях, тем самым включают многонаправленные трофические связи в функционирование пищевой сети в целом. В отличие от фиксированных значений трофических уровней, трофические спектры животных в речных

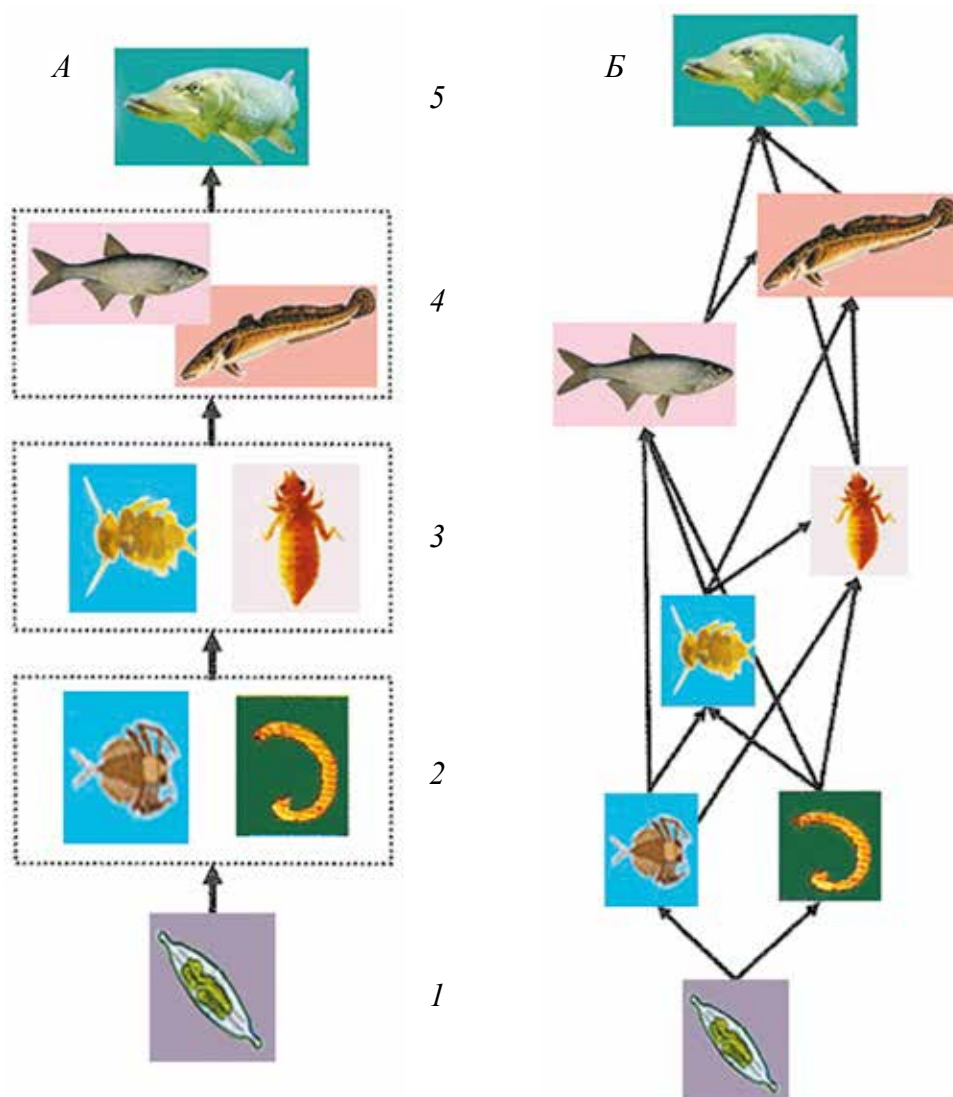


Рис. 2.49. Пищевая цепь при распределении речных гидробионтов по трофическим уровням (А) (цифрами обозначены трофические уровни); построение пищевой сети при распределении гидробионтов по их трофическим предпочтениям/спектрам (Б).

Модификация рисунка из: [Thorp et al., 2008]

экосистемах довольно часто изменяются в зависимости от качества продуктов питания, доступности пищи и степени сложности пищевых взаимосвязей [Thorpe et al., 2008].

В определенном речном биотопе (условно однородном участке русла) видовой состав биоценоза определяется наличием необходимых пищевых ресурсов, поскольку виды встречаются вместе не только потому, что приспособились к определенной среде, но и потому, что пищевые ресурсы позволяют им поддерживать, а то и увеличивать собственное обилие. Каждый из видов может обитать лишь там, где имеются необходимые ему объекты питания. В то же время для речных экосистем характерна крайне высокая динамика количества и качества пищевых ресурсов (суточных, сезонных, межгодовых), что создает специфические проблемы при изучении пищевых сетей. Например, для ритрали горных рек зоны муссонного климата биомасса водорослевых обрастаний камней в течение сезона может колебаться от долей миллиграмма (после паводка) до 7000 мг (в период эвтрофикации) хлорофильной массы на 1 м² [Богатов, 1994]. Столь существенное изменение биомассы водорослей отражается на количественном и качественном развитии других трофических уровней. Например, в среднем течении р. Кедровая (юг Приморского края), протекающей в горно-лесной местности, в условиях массового развития нитчатых водорослей наблюдалось резкое снижение биомассы амфипод, личинок ручейников, веснянок и поденок и значительное увеличение доли личинок хирономид. Одновременно была отмечена массовая гибель мальков симы, голяна и гольца [Богатов, 1994]. Серьезная перестройка трофической структуры биоценозов на этой же реке наблюдалась в период засухи на отшнурованных участках русла. В небольших изолированных биотопах при значительном уменьшении площади зеркала происходила концентрация «измельчителей» (главным образом амфипод) и быстрое истощение их пищевых ресурсов (листового опада). В условиях недостатка, а то и практически полного отсутствия детрита гаммариды переключались на животную пищу, поедая не только мелких личинок насекомых, но и более мелких амфипод, становясь, тем самым, каннибалами [Богатов, 1991]. По данным Тиуновой [2006], в ритрали лососевых рек наибольшим сезонным изменениям подвержены хищники, хищники-соскребатели и соскребатели. Их доля в период открытой воды может изменяться в 16–55 раз, при этом соотношение лидирующих трофических группировок на протяжении вегетационного сезона остается практически неизменным.

Каждый вид по-своему реагирует на изменение определенного пищевого ресурса: изменением либо численности, либо пищевого спектра. В сравнительно коротких пищевых цепях любое существенное изменение численности организмов какого-либо из трофических уровней сильно отражается на других уровнях, так как возможность перейти на другую пищу отсутствует. И наоборот, в богатых видами экосистемах животные могут выбирать разные

пищевые объекты. Если пищевой ресурс уменьшается, то, например, консументы разных трофических уровней способны переключиться на другой пищевой объект. При этом организмы, освобожденные от пресса хищников, восстанавливают свою численность. Благодаря такому переключению поддерживается динамическое равновесие между пищевыми объектами и их потребителями, что обеспечивает их длительное сосуществование. Например, экспериментально было показано, что если дрифтоядные рыбы при недостатке в водном потоке наземных беспозвоночных (основного объекта питания) переключались на растительноядных водных организмов, то в скором времени наблюдалось уменьшение численности водных беспозвоночных, что, в свою очередь, приводило к увеличению биомассы фитобентоса [Nakano et al., 1999; Baxter et al., 2004]. К эффекту снижения пресса рыб на растительноядный бентос приводило значительное увеличение поступлений в воду наземных прямокрылых, зараженных волосатиками *Gordionus* spp., которые в сезон размножения способны манипулировать поведением своих хозяев, вынуждая последних искать воду и погружаться в нее (рис. 2.50) [Sato et al., 2011].

Наибольшая изменчивость пищевых взаимосвязей характерна для нагульно-нерестовых рек, в которых в результате нагульных и анадромных миграций рыб формируются специфические пищевые цепи. Самыми известными анадромами являются тихоокеанские лососи. При продвижении к местам нереста они



Рис. 2.50. Схема жизненного цикла волосатика *Gordionus chinensis* и вызванного им перераспределения потока энергии из лесной экосистемы в речную. Показан процент от годового потока энергии, поступающей в сообщество японской форели *Salvelinus leucomaenis japonicas*, от разных категорий добычи (прямокрылые, наземные и водные беспозвоночные). Из: [Sato et al., 2011]

способны преодолеть сотни километров против течения. Нерестующие лососи оказывают мощное воздействие на речные экосистемы, сопоставимое с экстремальными явлениями: на нересте лососевые активно перекапывают грунт при строительстве нерестовых бугров, после нереста они в массе отмирают, заполняя своими телами речные биотопы*. Трупная органика разлагается за счет деятельности сапрофитов (бактерий и грибов), при этом в местах нереста могут наблюдаться заморные явления, что негативно сказывается на всем сообществе реки. Кроме того, трупы лососей могут потребляться донными беспозвоночными (главным образом амфиподами и некоторыми видами крабов), поедаться птицами и наземными млекопитающими.

Наиболее подробно сезонная динамика трофических сетей в нагульно-нерестовых реках была изучена в бассейне р. Лютога (о-в Сахалин) [Лабай и др., 2015]. Например, в небольшой нагульной р. Фрикена (рис. 2.51) ранней весной доминируют детритные пищевые цепи, основанные на листовом опаде, которые предопределяют развитие сообществ измельчителей и высокую концентрацию молодежи симы для нагула. К июню запасы детрита в грунте истощаются, уменьшается и биомасса зообентоса, что приводит к миграциям симы вниз по течению. В июле в период летней межени процветают сообщества пастбищных пищевых цепей, в результате чего вновь создаются условия для нагула молодежи симы и мальмы. Во второй половине августа–сентябре происходит массовый вылет имаго насекомых и снижение обилия ихтиофауны. Осенью развитие водного сообщества определяется поступлением в водоток листового опада и развитием макроизмельчителей. В осенне-зимний период общая биомасса макробентоса невысока, при этом на плесах в трофической структуре основную роль играют измельчители, а в зоне перекатов – поденки-соскребатели.

В нерестовой р. Партизанка (рис. 2.52) после весеннего половодья развивается перифитонное сообщество, а в затишных зонах скапливается детрит. В конце апреля–мае наблюдается вылет имаго перезимовавших личинок насекомых и развитие личинок весенней генерации. В мае–июне активизируется дрейф донных беспозвоночных, который по времени совпадает со скатом покатишков горбуши. В этот период в зонах осаждения детрита возрастает роль амфипод и поденок-сборщиков, а на перекатах отмечается развитие пастбищных пищевых цепей. В течение летней межени активизируются процессы микробной деструкции автохтонного детрита. В июле–первой половине августа возрастает кормовая значимость макробентоса, что создает условия для нагула бентосоядных рыб – красноперок и бычков. Во второй половине августа происходит массовый вылет имаго, который синхронизирован с началом нереста

* Считается, что бентосные сообщества нерестовых рек адаптированы к столь специфическому воздействию. Например, в реках о-ва Сахалин за несколько дней до нерестового хода наблюдается массовый вылет имаго водных насекомых [Лабай и др., 2015].

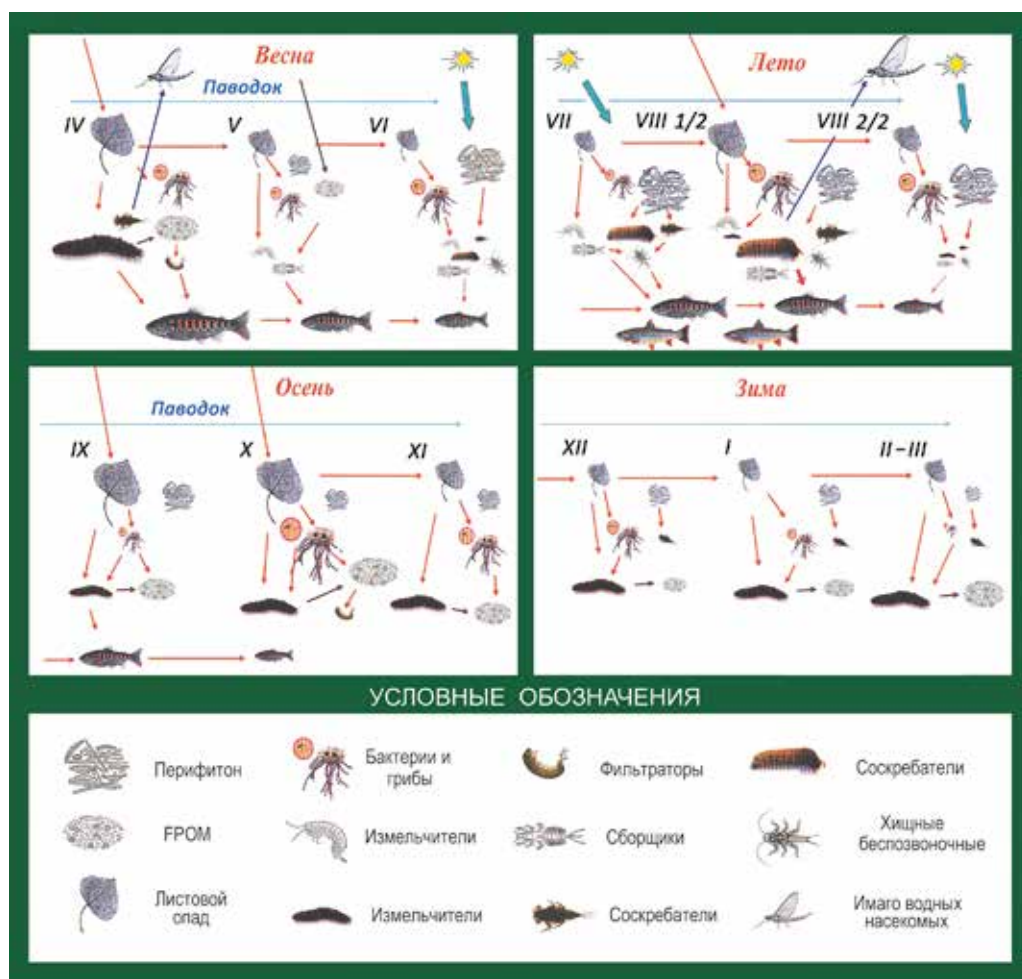


Рис. 2.51. Схема сезонной динамики трансформации органических веществ в малой нагульной р. Фрикена (бассейн р. Лютога, Сахалин). Римскими цифрами обозначены месяцы. Из: [Лабай и др., 2015], с исправлениями. Размер фигур примерно соответствует доле биомассы учтенной трофической группы в речном сообществе

горбуши. Последующие процессы деструкции трупной органики лососей происходят в основном за счет аммонифицирующих бактерий. Кроме того, трупы лососей потребляются наземными животными, а часть выметанной икры – рыбами. Развитие водного сообщества в осенне-зимнюю фазу связано с поступлением листового опада и повторным развитием аммонифицирующих бактерий. В бентосе основную роль вновь начинают играть измельчители аллохтонной органики. В подледный период донные сообщества концентрируются на участках стремнины, где наряду с измельчителями высокой плотности достигают коллекторы и хищники [Лабай и др., 2015].

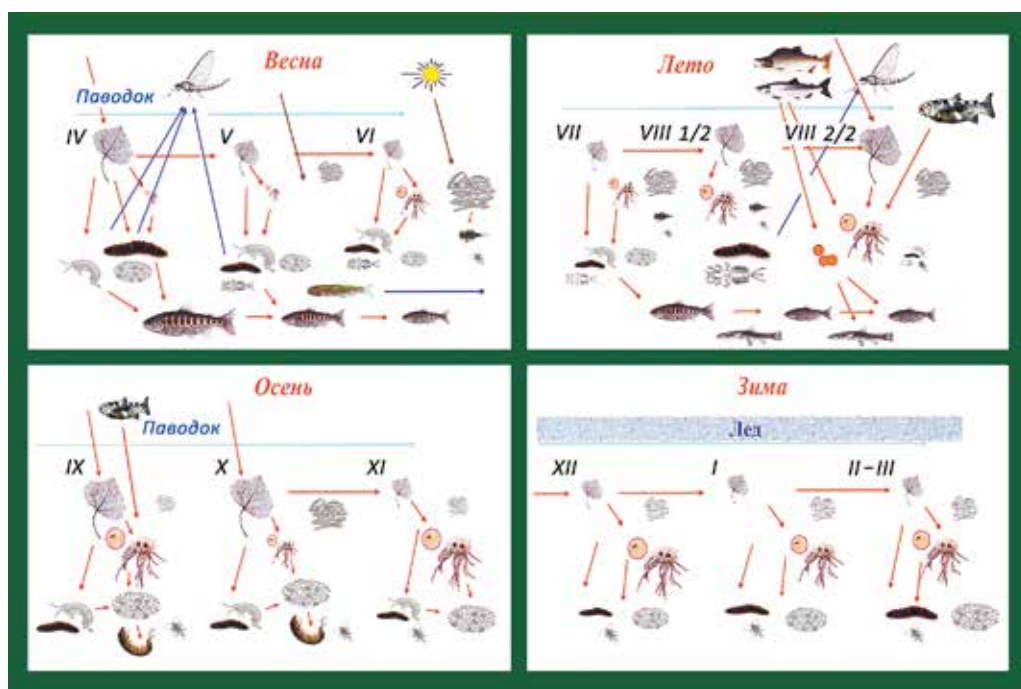


Рис. 2.52. Схема сезонной динамики трансформации органических веществ в малой нагульно-нерестовой р. Партизанка (бассейн р. Лютога, Сахалин). Римскими цифрами обозначены месяцы. Обозначения те же, что и на рис. 2.51. Из: [Лабай и др., 2015], с исправлениями

Исследования сезонных аспектов функционирования экосистем на различных участках ритрали позволили сахалинским специалистам построить для лососевых рек генерализированную схему трансформации органического вещества (рис. 2.53), где основными его источниками были обозначены водоросли перифитона, листовый опад и тихоокеанские лососи (тела и икра). Фактически, полученная схема отражает и среднюю за сезон трофическую структуру биоценоза нерестовой реки, основные элементы которой служат отличительной чертой «лососевых» рек Сахалина. При оценке сезонной динамики биомассы зообентосных сообществ в ритрали приморской нерестовой р. Кедровая, проведенной приморскими гидробиологами в разные временные периоды, было показано, что несмотря на неустойчивый гидрологический режим и мозаичную структуру биоценозов в речной экосистеме десятилетиями отмечается определенная стабильность средних за сезон соотношений биомассы основных таксономических групп гидробионтов (рис. 2.54). Причем в южной части Дальнего Востока подобная стабильность оказалась характерной для каждого типа водотока или типологического участка реки [Тиунова, 2007a].

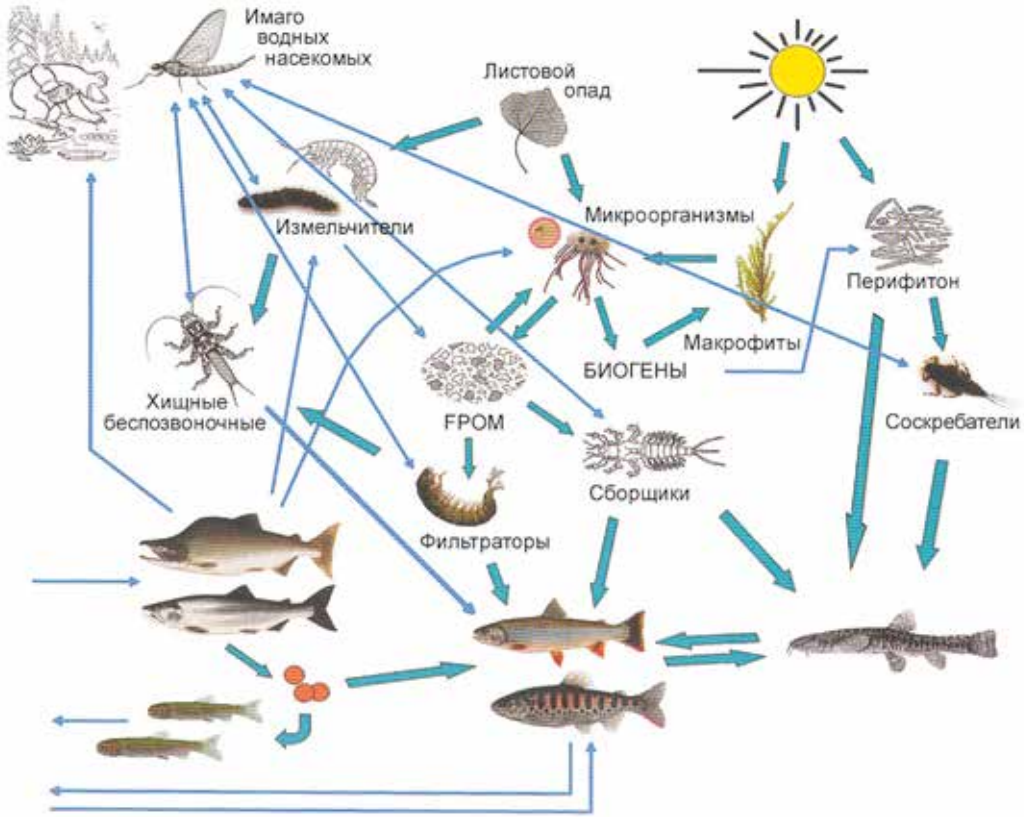
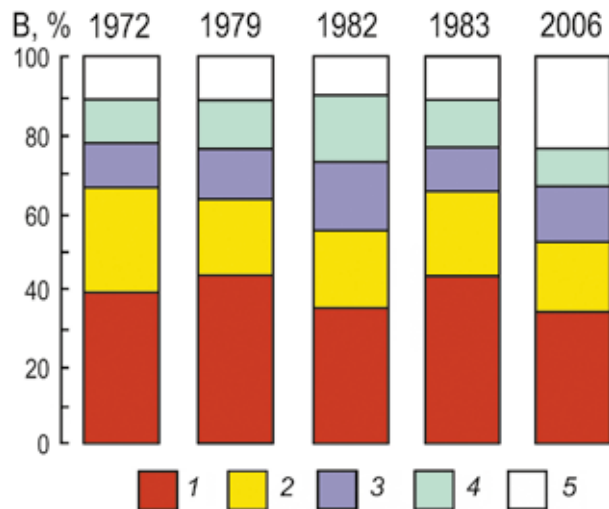


Рис. 2.53. Генерализованная схема трансформации органических веществ в нагульно-нерестовой реке Сахалина

Рис. 2.54. Биомасса (B , %) основных групп бентоса в среднем за вегетационный сезон в метариали р. Кедровая: 1 – личинки ручейников; 2 – личинки поденок; 3 – личинки веснянок; 4 – амфиподы; 5 – прочие; 1972 г. – по данным Леванидова [1977]; 1979 г. – по данным Кочариной с соавторами [1988]; 1982 г. – по данным Богатова [1994]; 1983 г. – по данным Тиуновой [2001]; 2006 г. – по данным Астахова [2009]



Полученные результаты свидетельствуют о том, что в условиях сезонной повторяемости экстремальных гидрологических (паводки) и биологических (нерест лососевых) событий не происходит разрушение речных биоценозов, что проявляется в многолетней повторяемости средних за сезон важнейших структурно-функциональных характеристик сообществ. Разнообразные природные механизмы, контролирующие возмущающие воздействия в экосистемах, направлены на непрерывную корректировку трофических взаимоотношений. Таким образом, динамика трофических сетей, в том числе сезонная, представляет собой фундаментальное свойство биоценозов, благодаря которому в динамичной среде при исторически сложившейся трофической структуре сообществ обеспечивается поддержание упорядоченного потока органических веществ, причем как автохтонного, так и аллохтонного происхождения.

2.4. ДРИФТ РЕЧНОГО БЕНТОСА

Под *дрифтом* бентосных беспозвоночных* (*drift of benthic invertebrates*) понимают их перемещение в речном потоке вниз по течению [Waters, 1972]. Кроме зообентоса с водной массой перемещаются микроорганизмы, водоросли и макрофиты**, упавшие на водное зеркало наземные беспозвоночные [Астахов, 2016], а также взвешенные и растворенные органические вещества [Newbold, O'Neill et al., 1982]. Движущую силу потока использует молодь многих видов рыб при покатных миграциях [Павлов и др., 2007]. Таким образом, благодаря дрейфу гидробионтов происходит масштабное расселение водных организмов, осуществляются внутривидовые связи и контакты между сообществами на нижележащих по течению участках русла с вышележащими.

Мигрирующими в толще воды донными животными питаются мальки рыб. За счет дрейфа беспозвоночных обеспечивается транспорт кормовых организмов с высокопродуктивных мелководных участков реки в места массового скопления рыб, например в заводи [Mason, Chapman, 1965]. Было показано, что скат молоди лососей рода *Oncorhynchus* совпадает с периодом максимальной интенсивности дрейфа беспозвоночных [Леванидова, Леванидов, 1962], вследствие чего донные организмы могут играть роль «буфера», смягчающего выедание мальков хищниками. Таким образом, оценка масштабов и закономерностей дрейфа гидробионтов является одним из важнейших элементов в развитии теории функционирования речных экосистем.

* В русскоязычной литературе в качестве синонима словосочетанию «дрифт донных беспозвоночных» иногда применяется термин «бентосток».

** В тропических реках часто наблюдается перемещение в речном потоке крупных фрагментов зарослей эйхорнии, или водяного гиацинта (см. рис. 2.8).

Обычно различают «активный» или «поведенческий» дрейф (*active or behavioral drift*) бентосных беспозвоночных, который осуществляется в результате самостоятельного подъема гидробионтов в толщу воды (такой подъем обычно происходит в ночной период), и «пассивный/постоянный» дрейф (*passive or constant drift*) – иногда его называют «непрерывным» дрейфом (*continuous drift*), – в котором участвуют организмы, случайно оторвавшиеся от субстрата [Waters, 1972]. Если в результате дрейфа гидробионтов их биомасса на грунте уменьшается, увеличивается или остается неизменной, то говорят соответственно об «отрицательном», «положительном» и «нейтральном» дрейфе [Богатов, 1988]. Дрейф зрелых куколок или нимф амфибиотических насекомых, сопровождающийся массовым вылетом имаго, называют «пред-имагинальным» дрейфом. В особых случаях выделяют «катастрофический» дрейф (*catastrophic drift*), который может быть вызван как экстремальными природными явлениями (крупные и катастрофические паводки), так и антропогенными факторами (залповый сброс загрязнений). В результате «катастрофического» дрейфа происходит резкое изменение структуры или разрушение (уничтожение) донных сообществ.

2.4.1. Суточная периодичность дрейфа

Активный дрейф беспозвоночных в теплый период года происходит в основном в ночные часы (рис. 2.55). При этом массовый подъем большинства мигрантов в толщу воды может наблюдаться с наступлением темноты. Этот эффект возникает за счет коллективных (т.е. сходных) свойств гидробионтов (например, реакция на снижение освещенности), благодаря которым особи ведут себя как единое целое, в том числе в тех случаях, когда организмы удалены друг от друга на большие расстояния. Тем не менее на протяжении суток у разных видов беспозвоночных и их размерных групп может наблюдаться разная ритмика активности (рис. 2.56). При определенных

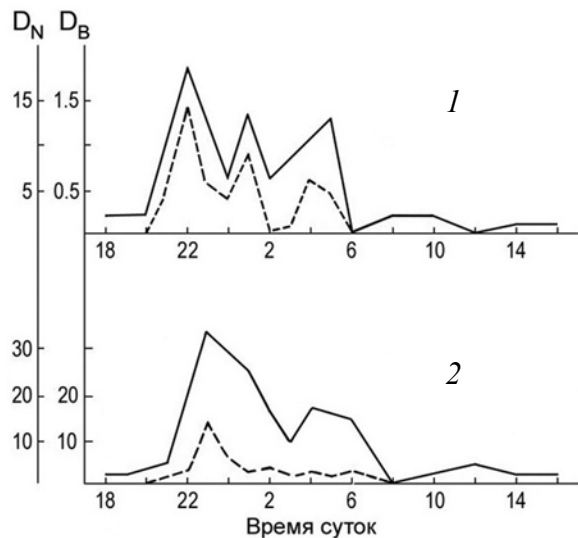


Рис. 2.55. Дрейф личинок веснянок *Caddisfly* (1) и личинок хирономид (2) в р. Буря (левый приток Амура) в начале сентября 1976 г.: D_N – численность (сплошная линия), экз. в сачке за 10 мин; D_B – биомасса мигрантов (пунктирная линия), мг в сачке за 10 мин. Из: [Богатов, 1994]

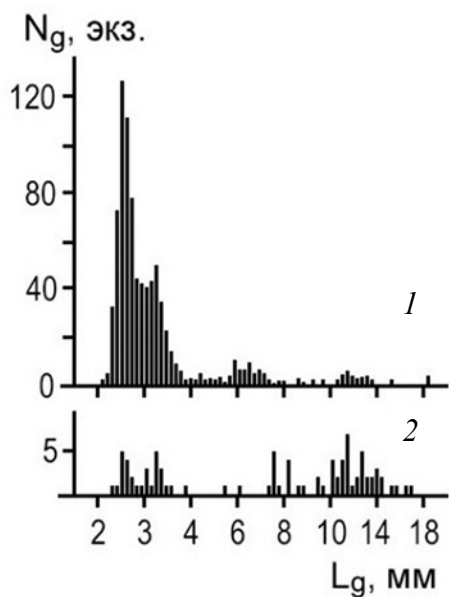


Рис. 2.56. Размерный состав *Gammarus lacustris* в р. Ухта в дрефте (1) и на грунте (2) в октябре 1979 г. (N_g – численность размерной группы, экз.; L_g – длина тела, мм). Из: [Богатов, 1994]

условиях активный подъем гидробионтов в толщу воды может происходить в дневное время. Например, в теплый период года на реках российского Дальнего Востока до 90 % миграций донных организмов происходит ночью [Богатов, 1994]. В то же время в подледный период активный дрейф гидробионтов наблюдается как в ночные, так и в дневные часы (рис. 2.57), причем численность дневных мигрантов обычно преобладает над численностью ночных [Богатов, Астахов, 2011].

Следует отметить, что далеко не все представители зообентоса участвуют в активном дрефте. Например, среди донного населения р. Рейн (в пределах французской территории) лишь около 18 % таксонов составили 98 % от общего числа дрейфующих организмов [Celot, 1996]. Среди активных мигрантов

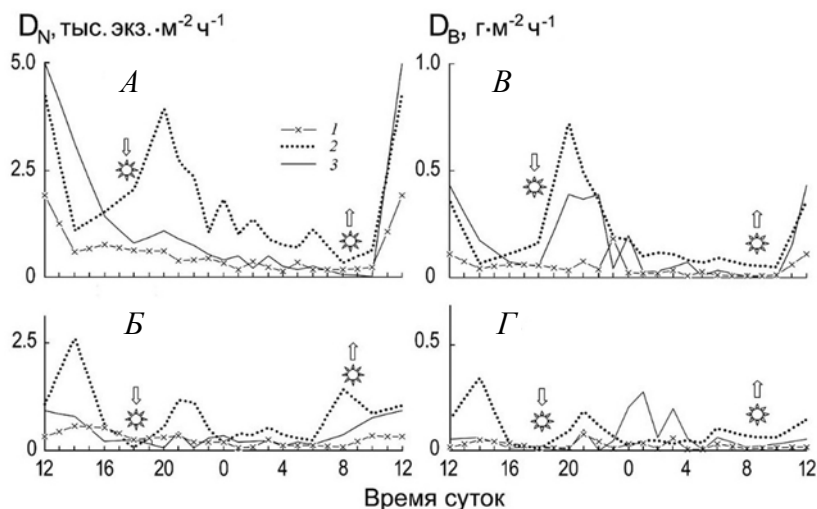


Рис. 2.57. Суточная динамика численности (D_N , тыс. экз./м²·ч⁻¹) и биомассы (D_B , г/м²·ч⁻¹) дрейфующих беспозвоночных через учетное сечение потока р. Кедровая (юг Приморского края). Даты: А, В – 19–20.12.2006 г.; Б, Г – 19–20.01.2007 г.; 1 – Diptera, 2 – Ephemeroptera, 3 – прочие беспозвоночные. Стрелками показано время захода и восхода солнца.

Из: [Богатов, Астахов, 2011]

степень участия в дрефте также может существенно различаться. Особенно это заметно при сравнении отдельных трофических групп беспозвоночных. Например, представители соскребателей в дрефте крайне редки, тогда как личинки многих видов насекомых, относящиеся к коллекторам (сборщикам), показывают высокую склонность к дрефту [Wilzbach et al., 1988].

В экваториальных реках была выявлена суточная периодичность дрефта бентосных диатомовых водорослей с максимумом миграций в дневной период [Gustavsson et al., 1978]. На равнинных реках Беларуси отмечен выраженный дрефт метафитона, который имеет максимальные значения во второй половине дня и минимальные – в утренние часы [Савич и др., 2006а, б]. Считается, что в основе этого процесса лежит суточный ход фотосинтеза. Временной сдвиг между максимумом фотосинтеза и интенсивностью дрефта метафитона объясняется накоплением в эпибентосном мате кислородных пузырей, способствующих его всплытию к поверхности.

Высокая дневная колонизационная активность керамических плиток была обнаружена у диатомовых и синезеленых водорослей в р. Кедровая (юг Приморского края). Ранее Богатовым [1994] было показано, что в автотрофной зоне реки в отсутствие экстремальных факторов дневной сестон на 50–60 % представлен бентосными водорослями. Однако оставалась неясной суточная динамика этого процесса, а также степень эффективности закрепления водорослей на новом субстрате*. В связи с этим в 2007 г. в метаритрали р. Кедровая были проведены эксперименты по заселению искусственных субстратов (в данном случае использовалась керамическая плитка) в условиях установившегося движения воды. Ширина потока на участке наблюдений составляла 8–12 м, максимальная глубина – 0,5–0,6 м, грунт гравийно-галечный с валунами (рис. 2.58). Всего выполнено четыре суточных наблюдения: 16–17 февраля, 15–16 мая, 13–14 августа и 11–12 ноября. На протяжении учетных суток каждую плитку экспонировали 6 ч – с 13:00 до 19:00 ч, с 19:00 до 01:00, с 01:00 до 07:00 и с 07:00 до 13:00 ч. По истечении соответствующего временного периода плитку вынимали из воды, а на ее место устанавливали новую. Обработка проб проводилась по стандартной методике (см. раздел 2.2).

В результате экспериментов было установлено, что в зимний, весенний и летний периоды в колонизации керамической плитки участвовали цианобактерии, диатомовые и зеленые водоросли, а осенью – цианобактерии и диатомовые. В целом, в обрастаниях как природного, так и керамического субстрата преобладали диатомеи, которые составляли соответственно 86,6 и 89,9 % от общего числа таксонов.

* В экспериментах по заселению водорослей искусственных субстратов время экспозиции плиток обычно составляло более 1 сут. Например, в аналогичных работах, проведенных на ручьях штата Мичиган (США), экспозиция керамических плиток составляла от 1 до 32 сут [Stevenson, 1983, 1984; Stevenson, Peterson, 1989].



Рис. 2.58. Установка керамических плиток на грунте р. Кедровая (показано стрелками) в августе 2007 г.
Фото М. Астахова

Отмечен широкий диапазон скорости заселения водорослями искусственных субстратов: от 4,0 до 70,0 млн кл. $\text{м}^{-2} \text{ч}^{-1}$ и от 0,8 до 55,0 $\text{мг} \text{м}^{-2} \text{ч}^{-1}$. Таким образом, за 6 ч экспозиции максимальная плотность водорослей на керамических плитках достигала 439,1 млн кл. м^{-2} (при биомассе 26,8 $\text{мг} \text{м}^{-2}$), а биомасса – 330,5 $\text{мг} \text{м}^{-2}$ (при плотности 223,1 млн кл. м^{-2}), что вполне сопоставимо с минимальными фоновыми значениями этих параметров.

В разные сезоны года активность преобладающих таксономических групп заметно различалась. В частности, у диатомовых водорослей скорость заселения плиток оказалась выше в первой половине года, чем во второй. При этом максимальная скорость колонизации этими водорослями

отмечена в мае, а минимальная – в августе (рис. 2.59, 1, 2). В то же время цианобактерии более высокую активность проявляли во втором полугодии, а более высокую – в первом, причем максимальная активность этих бактерий была отмечена в августе во второй половине дня, а наиболее низкая – в мае (рис. 2.59, 3, 4).

Таким образом, наши эксперименты показали высокую способность речных бентосных водорослей и цианобактерий к расселению и закреплению на новом субстрате, причем у исследованных водорослей проявилась суточная периодичность процесса миграций: наибольшая активность по заселению плиток диатомовыми водорослями отмечена в первой половине светового дня, наименьшая – вечером и ночью; цианобактерии максимально активны оказались во второй половине светлого времени суток, а минимально – в его первой половине.

По-видимому, суточная периодичность активных миграций реофильных бентосных водорослей так же, как и периодичность активного дрейфа зообентосных организмов, является общей особенностью речных экосистем.

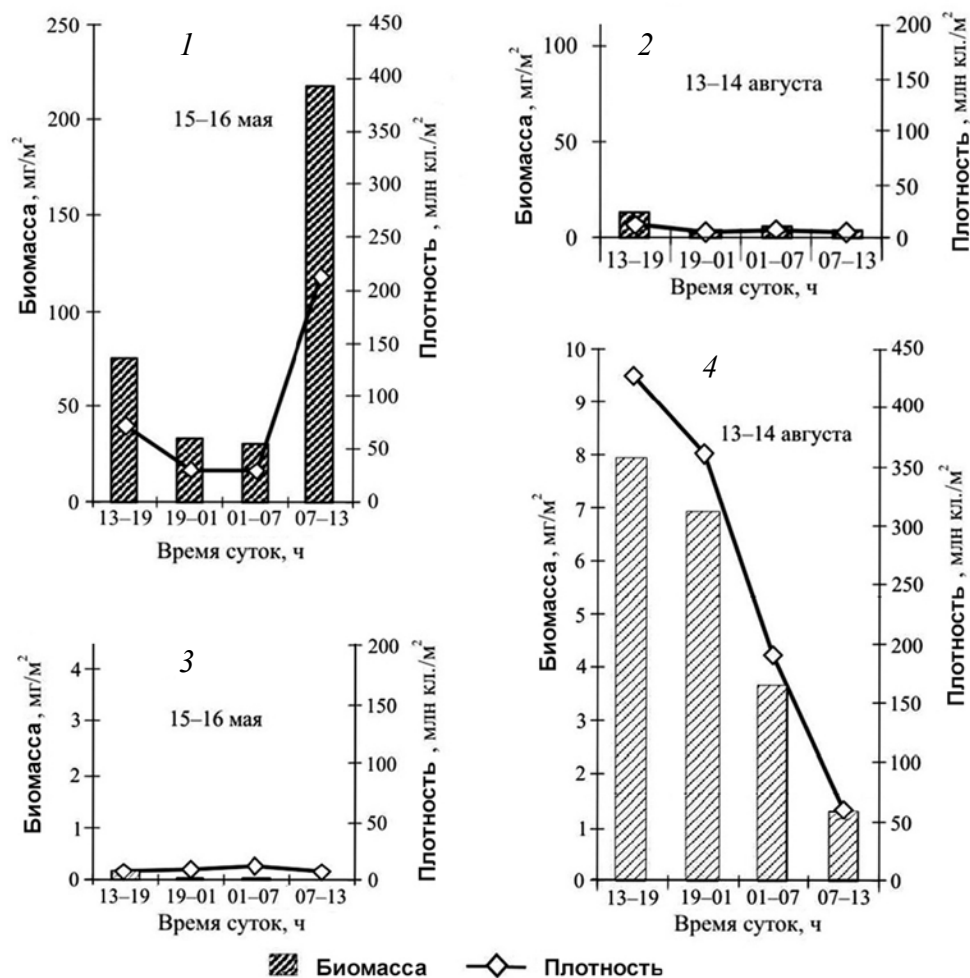


Рис. 2.59. Колонизация керамических плиток диатомовыми водорослями (1, 2) и цианобактериями (3, 4) в мае и августе 2007 г. в р. Кедровая (юг Приморского края). Из: [Богатов и др., 2009]

2.4.2. Вертикальное распределение дрейфующих гидробионтов

Немногочисленные литературные данные, касающиеся распределения в речном потоке дрейфующих донных беспозвоночных, разнообразны и противоречивы. Это связано с динамичностью процесса перемещения гидробионтов, а также с тем, что при количественной оценке дрейфа исследователи используют разные параметры: либо плотность дрейфа – численность и/или биомассу беспозвоночных в единице объема воды, либо интенсивность их дрейфа – численность и/или биомассу организмов, пронесенных через определенную площадь сечения водного потока за фиксированный интервал времени.

Наблюдения различались по продолжительности, проводились в разных климатических условиях, часто в разные сезоны года и на участках рек с разными гидрологическими условиями. Среди исследований дрейфа в умеренной зоне земного шара отметим работу Феноглио с соавторами [Fenoglio et al., 2004] на р. Эрро (северо-запад Италии). Авторы пришли к заключению, что на протяжении года реосиртон чаще всего более обилен в придонном слое потока. Преимущественно придонные миграции зообентоса по показателю плотности дрейфа были зафиксированы в р. Щугор (Урал, Россия) [Шубина, 1979, 1986, 2006], а по показателю интенсивности дрейфа – в р. Амур [Леванидов, Леванидова, 1979]. По данным этих же авторов интенсивность дрейфа в придонном горизонте р. Хор (бассейн Амура) составляла лишь 1/4–1/5 от уловов из поверхностного слоя [Леванидова, Леванидов, 1965; Леванидов, Леванидова, 1981]. В то же время Целлот [Cellot, 1989, 1996] в условиях относительно крупной р. Рона (Франция) отмечал достаточно равномерное распределение плотности реосиртона в толще воды. К такому же выводу пришел Бенке с соавторами [Benke et al., 1986], исследуя дрейф в черной субтропической реке Coastal Plain River (География, США). Интересно, что в крупных предгорных реках Камчатки (Россия) численность и биомасса донных беспозвоночных в единице объема воды как у поверхности, так и у дна также различались незначительно. Так, в р. Быстрая плотность мигрантов по их численности и биомассе у поверхности была соответственно на 8 и 12 % ниже, чем у дна, а в р. Паратунка, при практически одинаковой численности мигрантов, их биомасса близ поверхности потока была на 18 % выше [Чебанова, 2009].

У разных таксономических групп зообентоса могла быть разная модель поведения. Так, в ручье Valey Creek (штат Миннесота, США) интенсивность дрейфа рачков *Gammarus* в период вечернего максимума была практически одинаковой по всей вертикали потока, а у личинок *Baetis* оказалась выше в поверхностном слое [Waters, 1965] (рис. 2.60). В р. Миссисипи (США) ночная плотность личинок поденок в поверхностном слое более чем в 2 раза превосходила соответствующие придонные показатели, в то же время личинки ручейников в любое время суток предпочитали мигрировать у дна [Matter, Norwood, 1980]. В р. Кожим (Урал, Россия) снижение численности и биомассы в единице объема воды от дна к поверхности было свойственно водяным клещам и личинкам двукрылых, а у олигохет и личинок веснянок, напротив, от дна к поверхности эти показатели возрастали. В этой же реке при переходе от придонного горизонта к верхнему отмечено увеличение численности и снижение биомассы у личинок поденок, в то время как у личинок хирономид наблюдалась обратная картина [Шубина, 2006]. В р. Молога (бассейн Волги) в условиях весеннего половодья повышенная плотность олигохет и личинок поденок в светлое время суток оказалась приурочена к срединному и придонному горизонтам, а нематод и личинок хирономид – к поверхностному

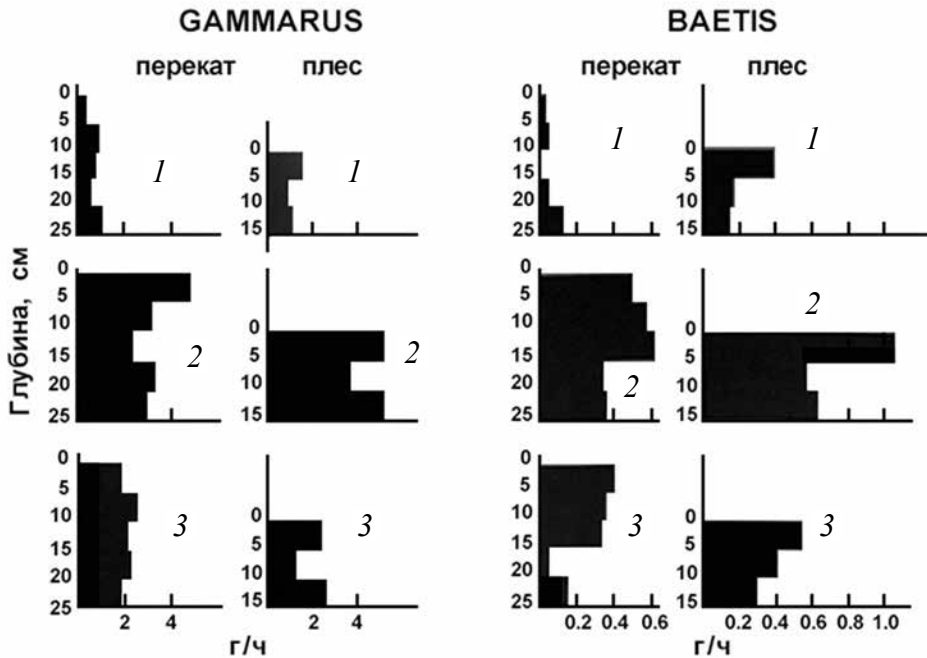


Рис. 2.60. Вертикальное распределение интенсивности дрифта (г/ч) *Gammarus* и личинок *Baetis* на перекате и плесе руч. Valey Creek (штат Миннесота, США) 11 сентября 1961 г. (1 – перед вечерним максимумом, 2 – в максимум, 3 – в последующий максимум дрифта). Из: [Waters, 1965]

горизонту. Однако суммарная дневная плотность беспозвоночных была выше в придонном горизонте [Иоффе, 1949]. Между тем дневные наблюдения на р. Варзуга (северо-западная часть России) показали, что наибольшая плотность реосиртона более характерна для поверхностного слоя воды [Барышев, 2001].

Вертикальное распределение дрейфующих организмов в дневное время связывают с разницей освещенности на разных горизонтах потока [Леванидова, Леванидов, 1962; Ключарева, 1963; Константинов, 1969]. Причем считается, что при смене дня и ночи происходит так называемая инверсия в стратификации реосиртона [Константинов, 1969]. Например, в р. Волга дневная численность мигрантов близ дна оказалась примерно вдвое выше, чем у поверхности, а в темный период суток наоборот – вдвое ниже [Константинов, 1969]. По данным Чебановой с соавторами [2004], даже при небольших глубинах разница в освещенности верхней и нижней части водной толщи оказывает существенное влияние на распределение мигрантов и длительность их пребывания в потоке. В частности, было установлено, что в р. Правый Кихчик (п-ов Камчатка, Россия) при глубине потока 0,6 м продолжительность дневных активных миграций у дна обычно дольше, чем у поверхности [Чебанова и др., 2004].

В исследовании, проведенном Астаховым и Богатовым [Богатов, Астахов, 2013; Astakhov, Bogatov, 2014] на полугорном участке р. Кедровая (юг Приморского края), было показано, что по мере возрастания скорости течения от дна к поверхности наблюдается достоверное уменьшение средней за год плотности дрейфующих беспозвоночных в единице объема воды (экз. м^{-3}). Это определяет практически одинаковую среднюю за год интенсивность дрейфа бентосных организмов по вертикали (экз. в сачке за 5 мин) (рис. 2.61). Причем плотность

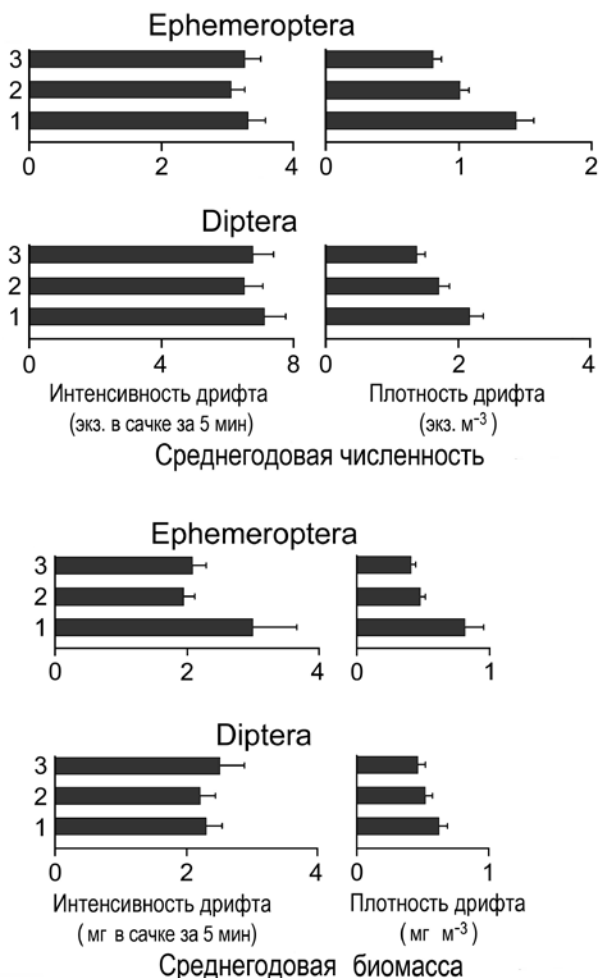


Рис. 2.61. Среднегодовые характеристики (плотность и биомасса) интенсивности и плотности дрейфа личинок Ephemeroptera и Diptera на разных горизонтах р. Кедровая. По оси ординат: 1, 2 и 3 – придонный, средний и поверхностный горизонты соответственно. Планки погрешностей отражают +SE (ошибка среднего значения). Из: [Богатов, Астахов, 2013]

личинок поденок на верхнем горизонте, по сравнению с нижним, по численности и биомассе была меньше в 1,8 и 2,0 раза; а у личинок двукрылых – в 1,6 и 1,4 раза соответственно. При этом средние на входе в сачки скорости течения между верхним и нижним горизонтами различались в 1,6 раза.

Отметим, что морфологически личинки поденок и двукрылых довольно сильно отличаются друг от друга. В частности, личинки поденок имеют для активного плавания хорошо развитые конечности и длинные хвостовые нити, а личинки двукрылых, обладая гусеницеобразной формой тела, таких приспособлений не имеют, хотя способны перемещаться в потоке, изгибая свое тело. В то же время общая картина дрейфа как поденок, так и двукрылых оказалась сходной и по интегральным показателям вполне сопоставимой с классической схемой переноса механической взвеси [Алексеевский, 2006]. Это обстоятельство указывает на

определенную пассивность перемещений беспозвоночных в речном потоке. Таким образом, в наиболее общем виде можно говорить о подъеме тем или иным способом организмов в верхние слои водной толщи и последующем пассивном сплаве личинок. Отличительной особенностью подобного способа миграций является использование движущей силы воды, позволяющей гидробионтам без дополнительных затрат преодолевать большие расстояния.

Измерение массы тела мигрирующих в потоке беспозвоночных показало, что у двукрылых наиболее крупные особи чаще всего дрейфовали в поверхностном горизонте, а у личинок поденок – в придонном (рис. 2.62). К сказанному заметим, что вертикальное распределение твердых частиц в речной струе определяется их гидравлической крупностью, т.е. скоростью их оседания в стоячей воде, и скоростью течения, поэтому вероятность попадания крупных фракций взвешенных частиц с диаметром $> 0,15$ мм в верхние слои потока относительно мала [Алексеевский, 2006]. В то же время наиболее крупные личинки двукрылых, в отличие от личинок поденок, в основном дрейфовали близ поверхности воды (рис. 2.62), что свидетельствует не только об активном характере их всплывания, но и о способности какое-то время удерживаться в верхнем горизонте. Особенно это относится к куколкам хиромид, быстрый подъем которых к поверхности для вылета имаго происходит за счет образования в области головогруды под шкуркой воздушного пузыря, обеспечивающего высокую положительную плавучесть тела [Константинов, 1958]. Подобный воздушный пузырь формируется и у личинок поденок последней стадии развития, вылет которых также происходит с поверхности водного зеркала (например, у личинок *Baetis*). Однако вылет имаго у других видов поденок (например, у представителей родов *Drunella* и *Cinigmula*) происходит в основном с камней или иного субстрата в прибрежной зоне реки [Тиунова, 1993], что, по-видимому, и ограничивает возможность появления взрослых личинок в поверхностном слое руслового потока.

При исследовании внутрисуточного перемещения гидробионтов по вертикали речной струи было установлено, что основные массы мигрантов не задерживались в определенном

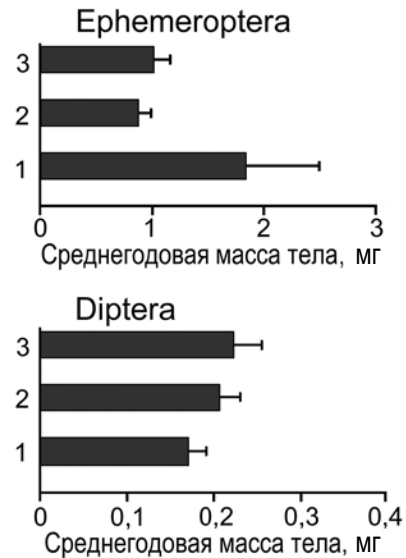


Рис. 2.62. Средняя за год масса тела личинок Ephemeroptera и Diptera, дрейфовавших на разных горизонтах р. Кедровая. По оси ординат: 1, 2 и 3 – придонный, срединный и поверхностный горизонты соответственно. Планки погрешностей отражают +SE (ошибка среднего значения). Из: [Богатов, Астахов, 2013]

слое водной массы долгое время, что подтверждается материалом, собранным в июньской и июльской сериях сборов с периодичностью в 0,5 ч. Как у личинок поденок, так и двукрылых в этот период наблюдалось постоянное перераспределение дрейфующих беспозвоночных между верхним и нижним горизонтами потока, приблизительно с интервалом в 0,5–1,5 ч, за исключением выраженного пика активности мигрантов, сформировавшегося в июле сразу после наступления темноты (рис. 2.63). Полученные результаты указывают на наличие сложного комплекса физических и биологических механизмов регуляции поведения беспозвоночных при их краткосрочных миграциях и вертикальной стратификации.

Отмеченная для теплого сезона сложная «волнообразная» картина вертикального перераспределения в течение суток максимальных и минимальных плотностей дрейфующих беспозвоночных, вероятно, связана с тем, что одни и те же организмы могут активизироваться на разных участках водотока в разное время и затем компактными группами осуществлять всплытие к поверхности, что указывает на возможность их стайного поведения. Если пробоотборником улавливаются мигранты, массовый подъем которых происходит в разное время и на разном удалении от точки наблюдения, то можно допустить, что в нижнем горизонте водной толщи в основном будут отлавливаться организмы, всплывающие с близлежащего участка дна, а в более верхних слоях – с более

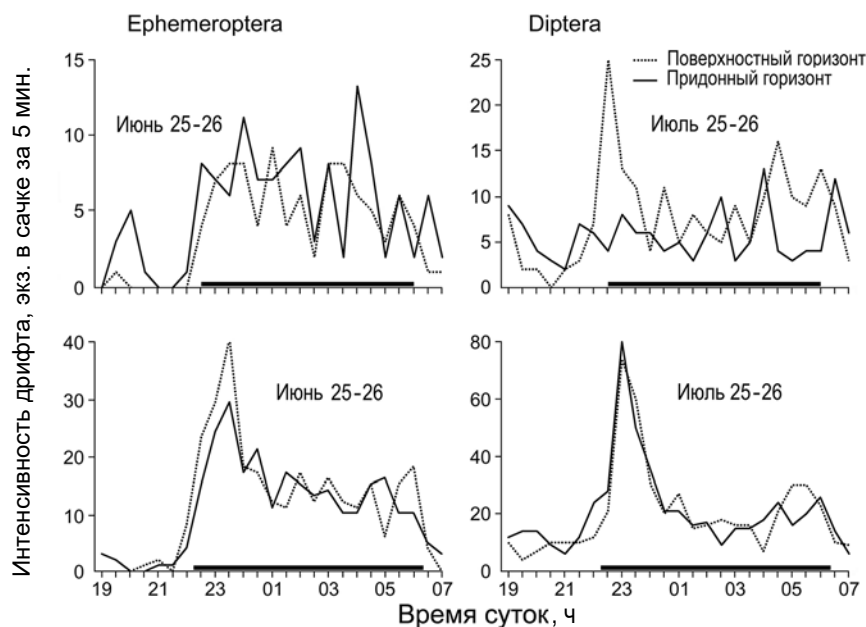


Рис. 2.63. Суточная динамика дрейфующих личинок Ephemeroptera и Diptera в поверхностном и придонном горизонтах потока. Ночной период обозначен широкой черной линией.

Из: [Astakhov, Bogatov, 2014]

удаленных биотопов. Очевидно, что в период активного всплытия беспозвоночных к поверхности и их последующего сплава происходит рассеивание мигрантов по вертикали за счет турбулентного перемешивания водной массы. При большей турбулентности потока распределение концентраций организмов в речной струе на завершающем этапе дрейфа должно быть более равномерным.

Разный характер подъемов дрейфующих особей, по-видимому, может определяться как физиологическими различиями у поведенчески разобщенных групп беспозвоночных, так и неоднородностью среды обитания по таким важнейшим показателям, как глубина, гидравлическая структура потока (скорость течения, турбулентность, гидростатическое давление), особенности грунта, условия освещенности, наличие убежищ и т.п. Несомненно, турбулентное перемешивание водных масс и плавучесть гидробионтов могут оказывать существенное влияние на вертикальное распределение организмов в речном потоке. Однако данное направление исследований еще не получило распространения при изучении миграционного поведения речных беспозвоночных, хотя у специалистов, изучающих вертикальное распределение молоди речных рыб при их покатной миграции, в этом плане уже имеются существенные наработки [Павлов, 1979; Pavlov, 1994; Павлов и др., 1995; Тарадина и др., 1997; Павлов и др., 2007; и др.]. Например, было установлено, что мальки полупроходных рыб, которые совершают массовые покатные миграции, в течение суток способны менять свою плавучесть с отрицательной днем на положительную ночью [Павлов и др., 1996]. Вопрос о наличии сходной способности у водных беспозвоночных пока остается открытым.

2.4.3. Миграционная активность, дистанция и время дрейфа

В разделе 2.2 было показано, что интенсивность дрейфа донных беспозвоночных (D_d), выраженная численностью или биомассой особей, пронесенных за определенное время через площадь живого сечения потока с шириной 1 м и высотой, равной глубине потока, определяется миграционной активностью животных (M), измеряемой количеством/биомассой организмов, перешедших за то же время в толщу воды с площади дна, равной 1 м², и дистанцией их дрейфа (L):

$$D_d = LM/L.$$

Следует отметить, что L , в свою очередь, определяется временем нахождения гидробионтов в толще воды T и скоростью течения воды V [Богатов, 1994]:

$$L = TV.$$

Результаты определения величин M , L и T методом меченого грунта [Богатов, 1979], полученные на мелководье р. Бурея (левый приток Амура) для

личинки поденок *Heptagenia soldatovi* и молодых личинок веснянок Capniidae gen. sp. juv., показали, что дистанция их дрейфа составила 200 и 34 м соответственно. Было отмечено, что интенсивность дрейфа у *H. soldatovi* была в 3,3 раза выше, чем у капниид, а величина миграционной активности – в 1,8 раза меньше. Таким образом, более высокая интенсивность миграций личинок поденок достигалась главным образом за счет большей дистанции их дрейфа, время пребывания их в толще воды было в 6 раз большее.

Очевидно, что при определенном значении T на участках с более высокими скоростями течения дистанция дрейфа у гидробионтов может быть значительно выше, чем на затишных участках. Для условий большой реки оценка L , M и T у донных животных может быть проведена на основе уловов двух дрейтовых ловушек, установленных в поверхностном и придонном слоях воды, и скорости перемещения беспозвоночных в водном потоке. В качестве примера расчета воспользуемся материалами Леванидова и Леванидовой [1979], исследовавшими дрейф личинок ручейников, поденок и веснянок на р. Амур в районе г. Хабаровск в июне–сентябре 1958 г. В работе этих авторов приведены результаты уловов двумя сетками с площадью входного отверстия по 0,5 м² каждая, которые устанавливались в разное время суток на 15 мин у поверхности потока и на глубине 10 м. Определенная автором с помощью аквариумов средняя скорость передвижения (V_1) разных видов взрослых амурских личинок составила примерно 0,05 м/с. Для удобства расчета примем, что высота сетки, с помощью которой производился отлов мигрантов, равна 0,5 м, а ширина – 1,0 м. Найдем время (t_1), которое понадобится животным, чтобы проплыть к поверхности воды расстояние, равное высоте сетки:

$$t_1 = 0,5 \text{ м} / 0,05 \text{ м/с} = 10 \text{ с.}$$

Средние поверхностные скорости течения на Хабаровском створе с июня по сентябрь составляют около 2–2,5 м/с, на глубине 10 м – 0,8–1,0 м/с. Допустим, что на глубине 10 м придонная скорость течения воды равна 0,9 м/с. Тогда за 10 с водная масса здесь пройдет путь, равный 9 м. Если ширина сетки – 1 м, то нижней сетью отлавливались организмы, поднимающиеся к поверхности с 9 м² площади дна. По данным Леванидова и Леванидовой ночью за 15 мин средний улов нижней сетки составил 3,3 экз., днем – 1,6 экз. В дневном дрейфе, вероятно, участвовали особи, образующие только пассивный дрейф, который считается постоянным в течение 1 сут. Следовательно, ночной улов нижней сеткой активно поднимающихся к поверхности особей (n_3) составит:

$$N_3 = (3/3 \text{ экз.} - 1,6 \text{ экз.}) / 2 = 0,85 \text{ экз.},$$

тогда

$$M_t = 0,85 \text{ экз.} / 9 \text{ м}^2 = 0,09 \text{ экз. м}^{-2},$$

где M_t – количество организмов, перешедших за 15 мин в толщу воды с 1 м²

площади дна. Если активный дрейф происходит в течение 8–9 ч, то M за 1 сут составит около 3 экз./м².

Найдем общую величину дрейфа (D_d) гидробионтов за 15 мин через площадь сечения потока глубиной 10 м и шириной 1 м. Поскольку за 15 мин средний ночной улов верхней сетки составил 6,2 экз., а высоту сетки мы приняли равной 0,5 м, то

$$D'_d = (3,3 \text{ экз.} + 6,2 \text{ экз.}) \times 10 = 95 \text{ экз.},$$

откуда

$$L = 95 \text{ экз.} \times 1 \text{ м} / 0,09 \text{ экз. м}^{-2} = 1060 \text{ м.}$$

Отметим, что если активный дрейф поденок длится 8 ч, то их суточная D_d окажется равной 3040 экз.

Средняя по глубине скорость течения (V) на изученном створе составляет примерно 1,1–1,5 м с⁻¹. Примем, что $V = 1,3$ м с⁻¹. В этом случае:

$$T = 1060 \text{ м} / 1,3 \text{ м с}^{-1} = 800 \text{ с.}$$

Так как подъем личинок к поверхности потока происходит за 3 мин. и за такое же время их спуск на дно, следовательно, сплав поденок с поверхностной водной массой продолжается около 8 мин. За это время водная масса проходит путь около 1000 м. Поэтому улов верхней сетки (6,2 экз.) эквивалентен смыву животных с площади дна, равной 1000 м². Если $M_t = 0,09$ м², то численность мигрирующих поденок с 1000 м² дна составит 90 экз. Легко определить, что от такого количества в поверхностной водной массе до глубины 0,5 м в сплаве участвует около 7 % особей.

Рассчитанная дистанция дрейфа для личинок ручейников и веснянок при такой же, как и у поденок v_1 , составила около 0,5 км. Однако этот показатель, скорее всего, занижен, так как для этих групп беспозвоночных средний за ночь улов включает в себя и те интервалы времени, когда придонная водная масса является местом активного дрейфа. Так, максимальная плотность сноса у веснянок наблюдалась в вечерние сумерки как раз в придонном слое [Леванидов, Леванидова, 1979].

Отметим, что миграционная активность у амурских поденок получилась в 20 раз ниже, чем на мелководье р. Бурея у *H. soldatovi*. Низкие значения M у гидробионтов в Амуре, по-видимому, объясняются постоянством в реке высоких скоростей течения, благодаря которым организмы при подъеме к поверхности могут перемещаться на большие расстояния. Действительно, при практически одинаковых с буреинскими личинками значениях T , у амурских поденок, из-за более высоких скоростей течения, дистанция дрейфа была в 5 раз выше. Поэтому в Амуре общая интенсивность дрейфа личинок через площадь сечения потока, имеющего такую же, как в Буреи, ширину в 1 м, а в высоту, равную глубине водотока в точке отбора проб, оказалась ниже всего в 4 раза.

В небольшой р. Ухта (река II порядка, бассейн Нижнего Амура, впадает в протоку Ухта близ пос. Богородское) значения основных параметров дрейфа беспозвоночных изменялись в широких пределах [Богатов, 1994]. Так, у личинок поденок *Cinigmula altaica* относительная миграционная активность (M'' , отношение миграционной активности к плотности поселения) изменялась от 12 до 100 % численности, L – от 3 до 25 м, T – от 13 до 45 с. У личинок поденок *Ameletus montanus* M'' составила 39 %, L – 22 м и T – 60 с; у *Gammarus lacustris* M'' – от 3 до 112 %, L – от 15 до 450 м и T – от 80 до 900 с, при этом минимальные значения основных параметров дрейфа гидробионтов были зарегистрированы в межень, максимальные – в период паводка. Таким образом, среди рассчитанных показателей дрейфа минимальные значения L и T отмечены у *Cinigmula altaica* (2,7 м и 13 с), максимальное время дрейфа (около 15 мин) – у *G. lacustris*, *H. soldatovi* и амурских поденок. Относительная миграционная активность изменялась в широких пределах, составляя, например, у *G. lacustris* от 3 до 112 % численности.

Из литературы известно, что средняя дистанция дрейфа, например, *Baetis* sp. в водотоках штата Миннесота (США) оказалась равна 50 м, для *Gammarus* sp. – 60 м [Waters, 1965]. Маклей [McLay, 1970], пересчитав данные Уотерса, определил, что дистанция дрейфа *Baetis* sp. может достигать 100 м, а у *Gammarus* sp. – 130 м. Далее он отмечал, что в реках Новой Зеландии у различных видов поденок средняя дистанция дрейфа колебалась от 0,5 до 19,3 м, максимальная – 47,5 м. По данным Эллиотта [Elliott, 1971], в реках Англии дистанция дрейфа у *Baetis* sp. и *Gammarus* sp. равна 20 м. Следовательно, рассчитанная дистанция дрейфа у личинок поденок в р. Амур, равная 1 км, оказалась наибольшей из всех, приведенных в литературе величин.

Важно, что приведенные выше значения параметров получены без учета индивидуальных размеров особей. Однако выяснилось, что указанные параметры могут заметно различаться у разных размерных групп. Например, осенью 1979 г. в р. Ухта наблюдалась высокая плотность населения амфипод *G. lacustris* и имелась возможность рассчитать параметры дрейфа для двух разных по размеру групп этих ракообразных, которые сведены в табл. 2.3. В результате расчетов было установлено, что при разных расходах воды относительная миграционная активность у молоди была почти в 2 раза выше, а дистанция дрейфа – в 7–8 раз больше, чем у взрослых особей.

Очевидно, что среди основных параметров дрейфа особое значение имеет дистанция дрейфа, указывающая длину участка русла, в пределах которого донные животные наиболее активно контактируют между собой, что важно для понимания особенностей функционирования речных сообществ в целом. Из полученных результатов видно, что с увеличением порядка водотока пространственный диапазон прямых контактов у бентосных животных увеличивается. Так, в меженный период в реке II порядка (р. Ухта) дистанция дрейфа у разных

Таблица 2.3. Плотность поселения и параметры дрейфа амфипод
в р. Ухта осенью 1979 г.

	18, 19 сентября		9, 10 октября	
V , м/с	0,55		0,29	
h , м	0,26		0,19	
Длина тела амфипод	До 4 мм	Более 4 мм	До 4 мм	Более 4 мм
N , тыс. экз./м ²	1,4	0,6	0,41	0,76
N_d , тыс. экз./сут	110,3	3,77	12,1	1,37
M , экз./м ² сут	268	75	82	59
M'' , %	19	13	20	8
L , м	412	50	148	23
T , с	750	90	510	80

П р и м е ч а н и е. V – скорость течения, h – глубина, N – плотность поселения.

групп гидробионтов находилась в пределах 3–22 м, в прибрежной части реки VI–VII порядка (среднее течение Буреи) – 34–200 м, а в реке XI–XII порядка (Нижний Амур) – 0,5–1,0 км.

При оценке степени взаимосвязи сообществ беспозвоночных животных, обитающих на определенных участках русла от вышележащих сообществ, важное значение имеет также оценка дистанции дрейфа взвешенного органического вещества сестона. Фактически, определение данного параметра позволяет оценить пространственные масштабы речных сообществ, в пределах которых происходит круговорот питательных веществ и их утилизация. Особое значение имеет определение дистанции взвешенного органического вещества для весенне-летнего меженного периода, когда в речном сообществе активно идут процессы обмена и формируется континуум.

Оценка дистанции сноса взвешенного органического вещества нами осуществлялась в меженный период в метаритрали р. Кедровая (юг Приморского края) в мае–июне 1984 г. и в кренали небольшой р. Медвежка (Магаданская область) в августе–сентябре 1990 г. Дистанция дрейфа оценивалась по оригинальной методике при учете сноса экзувиев куколок хирономид и вылета их имаго по уравнению:

$$L_e = N_e / N_i,$$

где L_e – дистанция дрейфа экзувиев; N_e – количество снесенных экзувиев за 1 сут через площадь сечения потока с шириной 1 м и высотой, равной глубине потока; N_i – количество имаго хирономид, вылетевших за 1 сут с поверхности потока площадью 1 м².

Проведенные исследования показали, что в р. Кедровая через сечение потока шириной 1 м ежедневно сносилось от 20 до 30 тыс. экзувиев куколок

хирономид. Одновременно за сутки с поверхности водотока в 1 м^2 происходил вылет 20–30 имаго этих насекомых. Из вышеприведенного уравнения видно, что дистанция дрейфа экзувиев на данном участке реки изменялась в пределах 600–1200 м. Заметим, что поскольку расстояние до сообщества кренали от точки наблюдения превышало 15 км, из полученных результатов следовало, что сообщество гидробионтов метаритрали в период наблюдений существовало вполне автономно, т.е. независимо от сообществ организмов кренали.

При оценке дистанции дрейфа взвешенного органического вещества на нижних участках кренали р. Медвежка было показано, что через сечение потока шириной 1 м ежесуточно сносилось 8,0–8,3 тыс. экзувиев куколок, а с 1 м^2 площади водной поверхности за то же время вылетело около 70–90 имаго. Расчетная дистанция дрейфа экзувиев оказалась незначительной и находилось в пределах 90–120 м.

Из изложенного следует, что формирование трофической структуры бентосного сообщества зоны ритрали, например увеличение здесь доли фильтраторов, связано не с функционированием «разрушителей» листового опада в кренали, как считалось ранее, а произошло в результате функционирования самого сообщества ритрали на вышележащем участке, примерно равном длине «пробега» взвешенного органического вещества сестона.

2.4.4. Соотношение дрейфа и биомассы беспозвоночных

Уже первые сообщения об активном дрейфе гидробионтов [Леванидова, Леванидов, 1962; Müller, 1954, 1963; Tanaka, 1960; Waters, 1961, 1962; и др.] показали, что в реках может сноситься огромное количество организмов. В связи с этим у исследователей возник вопрос: каким образом бентосные сообщества рек выдерживают столь, казалось бы, высокий уровень истощения? Были выдвинуты две гипотезы, объясняющие «парадокс» дрейфа: «*колонизационного цикла*» Мюллера [Müller, 1954, 1982] и «*компенсирующей продукции*» Уотерса [Waters, 1961, 1965]. Первая из них включает полет взрослых насекомых против течения, откладку яиц и массовое отрождение молоди в верховьях водотока, затем дрейфт неполовозрелых личинок для колонизации всех доступных мест обитания и новый полет имаго к верховьям для завершения цикла. Во второй гипотезе утверждается, что независимо от направления полета имаго компенсация дрейфа организмов (включая беспозвоночных без воздушной стадии) происходит за счет их продукции, т.е. уровень сноса особей является некоторой функцией продуктивности популяций. В качестве предварительного объяснения механизма активного дрейфа утверждалось, что в теплый период года у беспозвоночных в процессе роста может возникать конкуренция за какие-либо ресурсы (например, за пищу и пространство), вследствие чего происходит их дрейфт и заселение новых мест обитания. Подобное объяснение

дрифта было принято и в отечественной литературе [Жуйкова, 1974; Леванидова, Леванидов, 1965; Шустов, 1977, 1978; и др.].

В последующих исследованиях, связанных с проверкой выдвинутых гипотез, были получены противоречивые результаты, анализ которых изложен в соответствующих обзорах [Waters, 1972; Богатов, 1984a; Svendsen et al., 2004; и др.]. В частности, при изучении влияния конкурентных отношений на дрейф беспозвоночных обращалось внимание на связь количественных показателей дрейфа с плотностью поселения организмов на грунте. В результате одним исследователям удалось обнаружить положительную корреляцию между параметрами бентос/дрейф [Шубина, 2006; Elliott, 1968; Madsen, 1976; Pegel, 1980; Kennedy et al., 2014; и др.], другим – такой корреляции получить не удалось [Waters, 1966; Williams, Moore, 1985; и др.]. Неоднозначные данные были продемонстрированы при непосредственной оценке конкурентных взаимоотношений между личинками насекомых. Например, Хилдебранд [Hildebrand, 1974] в эксперименте отмечал влияние внутривидовой конкуренции за пищевые ресурсы на дрейф у личинок поденок и ручейников, а Байлей [Bailey, 1981] – влияние меж- и внутривидовой конкуренции за пространство на дрейф у личинок поденок. В то же время Статцнер и Могель [Statzner, Mogel, 1985] отмечали отсутствие связи меж- и внутривидовой конкуренции за пространство и пищу с дрейфом у поденок рода *Baetis*. Аналогичные результаты по отношению к внутривидовой конкуренции у личинок поденок получил Палмер [Palmer, 1995].

Очевидно, что при исследовании влияния плотности (скупенности) организмов на их дрейф особое значение должно отводиться выбору параметров дрейфа. К сожалению, в большинстве проведенных исследований использовались показатели либо плотности, либо интенсивности дрейфа, что не могло отразиться на интерпретации полученных результатов. В частности, если просто соотносить плотность или интенсивность дрейфа с плотностью гидробионтов на грунте, то чаще всего можно получить прямую взаимосвязь данных параметров, которая не всегда связана с влиянием конкуренции. Например, прямая взаимосвязь между плотностью гидробионтов на грунте и в дрейфе будет отмечаться при условии, когда доля мигрирующих организмов остается неизменной при их разных плотностях на грунте или когда доля мигрантов уменьшается при увеличении плотности гидробионтов, но с меньшей скоростью, по сравнению с возрастанием плотности организмов. Очевидно, что реальное влияние плотности на уровень дрейфа может проявляться только в тех ситуациях, когда при увеличении плотности гидробионтов возрастает и относительная доля мигрантов. При известных параметрах дрейфа такую связь можно выявить лишь при расчете удельного дрейфа (D_{CN} или D_{CB}).

Недавно автором были проведены исследования взаимосвязи между плотностью поселения доминирующих видов или групп видов речных бентосных

беспозвоночных и величиной интенсивности их дрейфа. Кроме того, проведена оценка изменения удельного дрейфа по параметру D_{CB} от изменения их биомассы на грунте [Богатов, 2014]. В последнем случае предполагалось, что если имеется влияние конкуренции между гидробионтами на дрейф, то с увеличением биомассы организмов на грунте должна увеличиваться и доля массы особей, участвующих в дрейфе.

Всего для анализа было привлечено 18 суточных наблюдений за дрейфом, проведенных в летние и осенние периоды 1976–1985 гг. на полугорных реках юга Дальнего Востока России, относящихся к бассейну Амура (реки Бурея в верхнем течении, Пильда в верхнем и среднем течении и Ухта в нижнем течении), а также на реках юга Приморского края (реки Комаровка и Кедровая в среднем течении). Исследуемые реки не подвержены антропогенному загрязнению, причем реки Комаровка и Кедровая протекают соответственно в пределах государственных природных заповедников «Уссурийский» и «Кедровая Падь». Анализировались 3 группы сообществ беспозвоночных: амфиподы *Gammarus lacustris*; личинки поденок (*Cinygmula altaica*, *Cinygmula* sp., *Pseudocloeon fenestratum*, *Ephemerella aurivillii*, *Baetis bicaudatus*, *Baetis* sp.) и личинки хирономид (главным образом из семейства Orthoclaadiinae).

Отлов мигрирующих в толще воды беспозвоночных осуществлялся с помощью дрейфовых сачков с входным отверстием 25×25 см и глубиной около 1 м. При изучении суточной динамики дрейфа сачки устанавливали в водоток каждые 0,5 или 1 ч в ночное время и каждые 2 или 4 ч в дневное. Время экспозиции сачка при разовом отборе дрейтовой пробы составляло 10 мин. Чтобы дрейфовая сеть в период отлова беспозвоночных сохраняла свои фильтрационные характеристики, необходимое время экспозиции сачка делилось на части (например, при общей 10-минутной экспозиции сачок устанавливали 2 раза по 5 мин, а при повышенном количестве взвесей в воде – 2 раза по 3 мин и 1 раз на 4 мин, затем отобранные пробы объединяли в одну).

В местах отбора проб дрейфа отбирались количественные пробы бентоса. Для этих целей использовали складной бентометр с площадью захвата 25×25 см [Богатов, 2005]. В каждой точке отбиралось 3–4 пробы зообентоса. Чтобы на выбранном участке исключить влияние фактора беспокойства на ход дрейфа, такие работы проводились сразу после завершения отбора дрейфовых проб. Глубина водотока в местах отбора проб дрейфа и зообентоса составляла от 0,25 до 0,4 м.

По результатам уловов дрейфовых ловушек находили плотность дрейфующих организмов (D_d) и интенсивность дрейфа (D_R), методы расчета которых изложены в разделе 2.2.

Здесь важно напомнить, что с помощью показателя D_{RB} (интенсивность дрейфа, выраженная в единицах массы) оценивается биомасса организмов, пронесенных над 1 м^2 поверхности грунта. Наиболее существенный момент

оценки бентостока предложенным способом заключается в том, что он дает возможность рассчитать *удельный дрейфт* (D_{CB} – *specific drift rate*), представляющий собой отношение интенсивности дрейфа гидробионтов к их биомассе (B) на 1 м^2 площади грунта. В этом случае:

$$D_{CB} = D_{RB}/B,$$

где D_{CB} – удельный дрейфт гидробионтов (сут^{-1}), учитывающий их биомассу (B) на площади дна, равной 1 м^2 . Фактически, с помощью удельного дрейфта проводится оценка доли массы гидробионтов, принявших участие в суточном дрейфте, по отношению к их биомассе на грунте: чем выше значение удельного дрейфта, тем большая доля гидробионтов приняла участие в дрейфте.

Проведенная для разных групп бентосных беспозвоночных оценка D_{RB} показала слабую положительную корреляцию между дрейфтом и биомассой гидробионтов на грунте (рис. 2.64, верхний ряд). Таким образом, в теплое время года, когда происходил активный рост гидробионтов, при прямом сопоставлении интенсивности дрейфа донных организмов с их биомассой на грунте проявлялась хоть и слабая, но прямая связь между параметрами биомасса/дрейфт. В то же время при оценке для тех же беспозвоночных их удельного дрейфта (D_{CB}) отмечалась значимая отрицательная корреляция

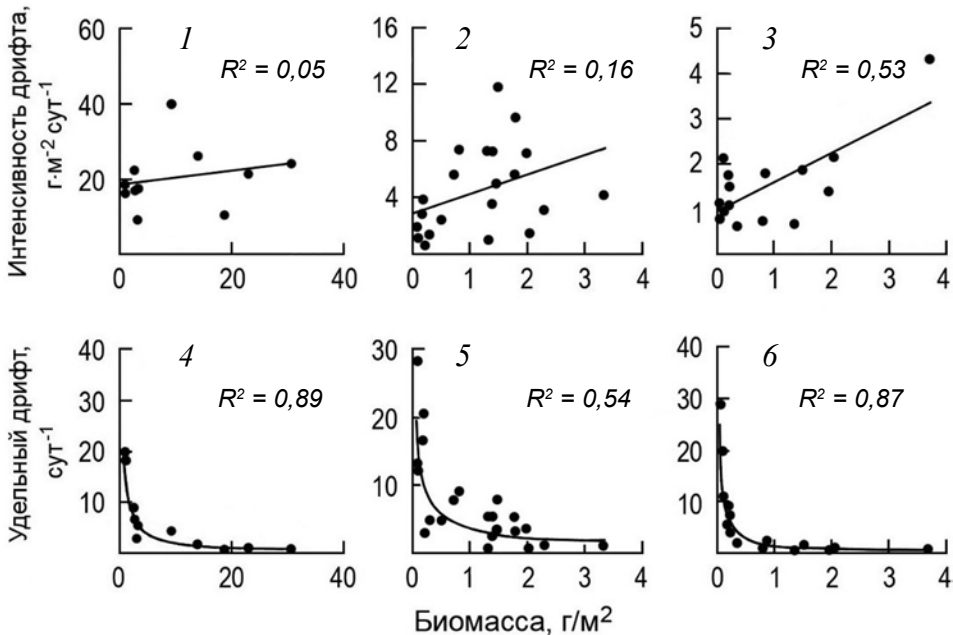


Рис. 2.64. Связь между интенсивностью дрейфа (1, 2, 3), удельным дрейфтом (4, 5, 6) в реках бассейна Нижнего Амура и биомассой гидробионтов на грунте (г/м²) в теплые сезоны: 1, 4 – *Gammarus lacustris*; 2, 5 – личинки поденок; 3, 6 – личинки хирономид.

Из: [Богатов, 2014]

этого параметра с биомассой гидробионтов (рис. 2.64, нижний ряд). Таким образом, при увеличении биомассы гидробионтов на грунте доля участников дрефта снижалась, причем при низкой биомассе организмов показатели удельного дрефта гидробионтов варьировали в широких пределах, в то время как при наиболее высоких биомассах доля участников дрефта была стабильно низкой. В частности, у амфипод, относящихся к наиболее подвижным представителям зообентоса, наиболее широкий разброс показателей удельного дрефта наблюдался при биомассе до 5 г/м^2 и составлял примерно $2\text{--}20 \text{ сут}^{-1}$. Следовательно, суточный дрефт ракообразных в интервале биомасс до 5 г примерно в $2\text{--}20$ раз превышал их биомассу на грунте. При биомассе около 10 г/м^2 удельный дрефт гаммарид не превышал 5 сут^{-1} , а при более высоких значениях биомассы показатели удельного дрефта были ниже 2 сут^{-1} . У личинок поденок максимальный разброс величин удельного дрефта наблюдался при биомассах до 2 г/м^2 , а у личинок хирономид – до $0,5 \text{ г/м}^2$, и в обеих группах гидробионтов этот показатель достигал около 30 сут^{-1} . При значениях биомассы у личинок поденок и веснянок свыше 2 г/м^2 , а у личинок хирономид свыше 1 г/м^2 показатели удельного дрефта были ниже 2 сут^{-1} . При наиболее высоких значениях биомассы удельный дрефт всех трех групп гидробионтов был менее 1 сут^{-1} . Все это говорит о низкой миграционной активности исследуемых беспозвоночных при их максимальных биомассах на грунте и соответственно отсутствии значимого влияния конкуренции между гидробионтами на их дрефт.

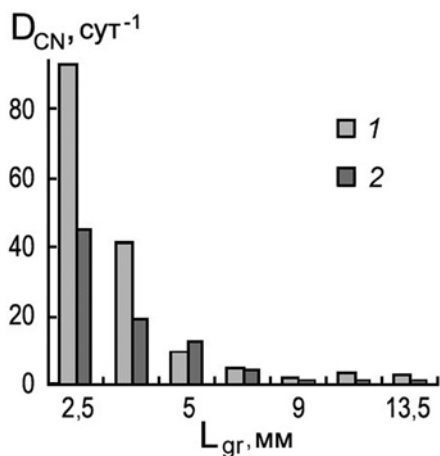


Рис. 2.65. Связь между удельным дрефтом размерных групп (D_{CN} , сут^{-1}) и размерами (L_{gr} , мм) *Gammarus lacustris* в р. Ухта (бассейн Нижнего Амура) в конце августа (1) и октябре (2).

Из: [Богатов, 2014]

Исследование удельного дрефта у разных размерных стадий амфипод и личинок поденок также показало неоднозначную картину. В частности, для амфипод наиболее высокие значения удельного дрефта оказались характерны для более мелких особей, обладающих, как известно, более высокой удельной скоростью роста. В частности, в р. Ухта в сентябре 1979 г. D_{CN} молоди амфипод с длиной тела около $2,5 \text{ мм}$ составил почти 90 сут^{-1} , а у рачков с наиболее крупными размерами ($13,5 \text{ мм}$) – всего около 2 сут^{-1} (рис. 2.65). Этот же показатель в октябре (перед ледоставом) для тех же групп амфипод был заметно ниже и составил около 45 и 1 сут^{-1} соответственно (рис. 2.65), причем стабильно низкие значения удельного дрефта в обоих случаях отмечены

для половозрелых особей, длина тела которых обычно превышает 7–8 мм [Богатов, 1991]. Снижение активности в дрефте амфипод в позднеосенний период, очевидно, связано с понижением температуры воды и соответственно двигательной активности у гидробионтов [Жуйкова, 1974; Шубина, 2006; Астахов, 2008; и др.]. Полученные результаты косвенно указали на наличие определенной зависимости удельного дрефта гидробионтов от величины их удельного роста, поскольку известно, что удельный рост у беспозвоночных с увеличением массы организмов снижается. В то же время некоторые личинки поденок, например личинки *Baetis bicaudatus*, на ранних стадиях их развития (в нашем случае до 5 мм длины особей, при максимальных размерах личинок около 8–9 мм) демонстрировали практически одинаковый удельный дрефт, который в среднем составил примерно 7 сут^{-1} (рис. 2.66). Таким образом, в последнем случае нет оснований связывать миграционные возможности личинок поденок с величиной удельной продукции разноразмерных особей.

Проведенные в настоящей работе расчеты удельного дрефта вошли в противоречие с гипотезой, объясняющей дрефт организмов конкурентными отношениями между животными за субстрат и пищу. Очевидно, что для исследованных групп беспозвоночных конкуренция за место и пищу, если таковая и имеется, не может оказывать значимого влияния на дрефт гидробионтов. В исследованных случаях при максимальных биомассах всех групп беспозвоночных показатели их удельного дрефта были ниже 1 сут^{-1} . Это означает, что если бы все особи участвовали в дрефте, то дистанция их дрефта была бы меньше 1 м. Таким образом, нет оснований говорить о масштабных миграциях гидробионтов в условиях их максимальных биомасс.

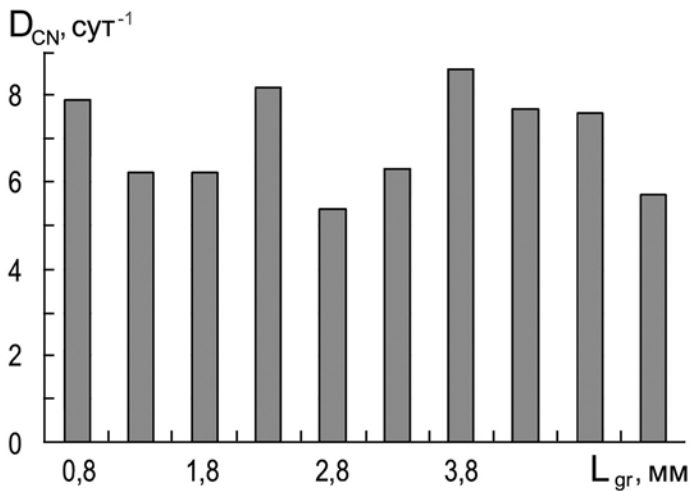


Рис. 2.66. Соотношение между удельным дрефтом размерных групп ($D_{CN}, \text{ сут}^{-1}$) и размерами ($L_{gr}, \text{ мм}$) личинок *Baetis bicaudatus* в р. Пильда (бассейн Нижнего Амура) в июле.

Из: [Богатов, 2014]

Снижение показателей удельного дрефта при увеличении биомассы амфипод и личинок насекомых (в нашем случае поденок и хирономид) может иметь разное функциональное значение. Что касается амфипод, то по отношению к этой группе гидробионтов интересны результаты лабораторных экспериментов Вильямса и Мура [Williams, Moore, 1985] с *Gammarus pseudolimnaeus*. Эти авторы добавляли в проточные резервуары по 20, 50, 200 и 600 особей гаммарид и затем наблюдали изменения их дрефта. Оказалось, что при добавлении в резервуар дополнительных особей показатели дрефта амфипод заметно снижались. Вильямс и Мур выдвинули гипотезу, что уменьшение дрефта *G. pseudolimnaeus* было связано с пищевым поведением этих рачков, которые демонстрировали коллективный тип питания и часто в период потребления пищи собирались в больших количествах (например, 900 экз. на 0,1 м² площади грунта).

Аналогичное пищевое поведение известно и для других видов речных амфипод [Богатов, 1994]. С учетом того, что в нашем случае минимальные показатели удельного дрефта у *G. lacustris* отмечены исключительно для половозрелых особей, можно допустить, что снижение дрефта рачков при увеличении их биомассы на грунте связано не только с пищевым, но и с половым поведением. В частности, у самок амфипод после вымета яиц в марсупиальную сумку появляется необходимость совместного с самцом вынашивания молоди (в этом случае самец захватывает самку со спины и в таком положении пара находится несколько суток). Очевидно, что при высокой плотности амфипод встреча половых партнеров не вызывает затруднений. Высокий удельный дрефт среди неполовозрелых молодых экземпляров, которые ведут подвижный образ жизни, но которые, в силу небольших размеров, еще не могут считаться хорошими пловцами, по-видимому, может являться следствием их частого вовлечения в дрефт течением воды.

Что касается личинок поденок и хирономид, то снижение показателей удельного дрефта с увеличением их биомассы на грунте либо постоянство значений удельного дрефта на разных стадиях развития организма может быть связано с формированием стайного поведения этих личинок, обеспечивающего им предстоящий массовый (т.е. одновременный) вылет имаго. Дело в том, что имаго исследованных водных насекомых живут всего несколько дней, а то и часов, они не отличаются хорошими летными качествами, а у имаго поденок и большинства видов хирономид редуцированы ротовые органы. У таких насекомых спаривание обычно происходит в условиях одновременного вылета и последующего роения. Таким образом, снижение удельного дрефта у более взрослых личинок насекомых может быть связано с формированием стайного поведения беспозвоночных и необходимостью максимально возможной концентрации особей на определенных участках водотока задолго до их массового вылета. Пока нам неизвестны особенности данного процесса. По-видимому,

у разных видов реофильных личинок подготовка к массовому вылету может происходить по разным сценариям. Например, Холл с соавторами [Hall et al., 1980] отмечал повышенное вовлечение в дрейф не у молодых, а у наиболее взрослых нимф поденок *Trycorythodes atratus*. Очевидно, что массовый вылет имаго с редуцированными ротовыми органами обусловлен не только экологическими условиями на определенных участках рек, но и наличием у взрослых личинок насекомых стайного инстинкта. В то же время для выявления механизмов формирования стайного инстинкта на этапе личиночной стадии требуются дальнейшие исследования.

2.4.5. Соотношение дрейфа и продукции беспозвоночных

Оценить масштаб суточного изъятия продукции из популяций и биоценозов за счет дрейфа можно с использованием параметра C_d (см. раздел 2.2), проследив его изменение в продольном профиле реки:

$$C_d = (D_d / P_{rd}) 100 \%,$$

где C_d – доля суточной продукции организмов в %, изымаемая с вышележащего участка водотока за счет их дрейфа; D_d – биомасса организмов, снесенных через сечение реки за сутки в пункте наблюдения; P_{rd} – суточная продукция организмов на грунте выше пункта наблюдения [Богатов, 19846].

Предварительные расчеты C_d были проведены Богатовым [1994] для популяции *Gammarus lacustris* на разных участках р. Пильда (бассейн Нижнего Амура). Оказалось, что в условиях межени доля суточной продукции амфипод, изымаемая в результате дрейфа с участка русла, расположенного выше места наблюдения, составляла незначительную долю суточной продукции сообществ этих рачков и уменьшалась с 5,6 % в верховьях реки до 1,6 % на среднем течении (рис. 2.67). Таким образом, по мере удаления от истока реки все большая часть продукции популяции амфипод распределялась внутри экосистемы водотока (например, в виде пищи для рыб, элиминации и пр.).

При расчете суммарных за вегетационный сезон (год) показателей удаляемой за счет дрейфа продукции рассчитывался показатель C_y , %:

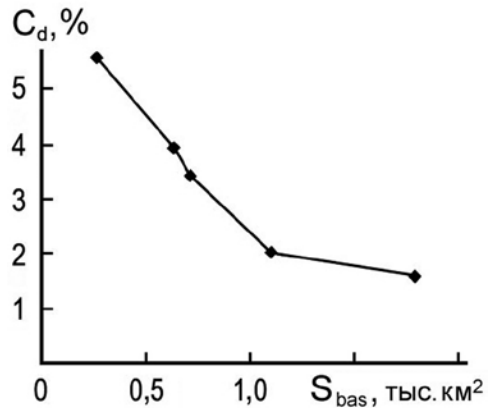
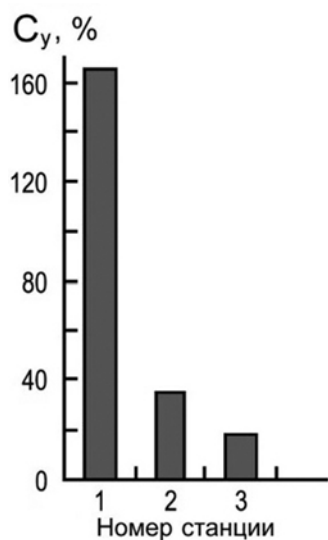


Рис. 2.67. Доля суточной продукции *Gammarus lacustris* (C_d , %), изымаемая за счет дрейфа с вышележащего участка речного русла, в зависимости от площади бассейна (S_{bas} , тыс. км²) р. Пильда (бассейн Нижнего Амура). По материалам Богатова [1994]

$$C_y = (D_y/P_{ry}) 100 \%,$$

где D_y – суммарная за год биомасса организмов, снесенных через сечение реки в районе пункта наблюдения; P_{ry} – годовая продукция организмов на грунте выше створа наблюдения.

При расчете показателя C_y нами были использованы данные, опубликованные в работе Пирсона и Крамера [Pearson, Kramer, 1972]. Эти авторы провели расчеты годовой продукции (P_{ry}) на 1 м² грунта и суммарного за год дрефта (D_y) у личинок поденок *Baetis bicaudatus* и личинок ручейников *Oligophlebodes sigma* для трех участков небольшой горной р. Темпл Фок (Юта, США). Станции наблюдения здесь располагались в 0,2, 1,8 и 4,2 км от истока, а средняя площадь дна реки составляла между истоком и 1-й станцией 620 м², между 1-й и 2-й станциями 5856 м² и между 2-й и 3-й станциями 9504 м². Кроме того, наблюдения за плотностью личинок велись и на 4-й станции, расположенной в 6,3 км от истока. Оказалось, что у *B. bicaudatus* величина C_y по мере удаления от истока реки значительно снижалась (рис. 2.68), хотя годовой дрефт этих гидробионтов с удалением от истока в ряде случаев (например, в 1969 г.) увеличивался (табл. 2.4). У *O. sigma* перераспределение продукции личинок на станциях наблюдения имело иной характер. В частности, наиболее низкие значения C_y у этого вида наблюдались в верховьях реки (1-я станция). На 2-й станции этот показатель заметно увеличивался, а к 3-й станции его значения либо уменьшались (1968 г.), либо оставались неизменными (1969 г.) (табл. 2.4). Обращает на себя внимание высокое значение C_y на 1-й станции у *B. bicaudatus*, которое превышало величину годовой продукции этих личинок на верхнем участке (рис. 2.68). Понятно, что в результате такого дрефта биомасса *B. bicaudatus* в верховьях реки должна была снизиться еще до завершения вегетационного сезона, что и подтвердилось результатами наблюдений [Pearson, Kramer, 1972].



Нетрудно заметить, что дрефт личинок *B. bicaudatus* оказал существенное влияние на их перераспределение в р. Темпл Фок. В частности, у этих поденок в течение вегетационного сезона четко прослеживалось смещение ядра популяции, т.е. зоны максимальной плотности личинок, от верховьев реки вниз по течению (рис. 2.69, 1). В популяции же *O. sigma* перераспределение личинок на

Рис. 2.68. Доля годовой продукции *Baetis bicaudatus* ($C_y, \%$), изымаемая за счет дрефта с вышележащего участка речного русла на станциях наблюдения в р. Темпл Фок (Юта, США) в 1969 г. Рассчитано по материалам Пирсона и Крамера [Pearson, Kramer, 1972]

Таблица 2.4. Годовая продукция на 1 м² ($P_{г\text{у}}$) выше створа наблюдения ($P_{г\text{н}}$), дрейф ($D_{г\text{у}}$) и показатель $C_{г\text{у}}$ у *Baetis bicaudatus* и *Oligophlebodes sigma* в р. Темпл Фок (США)

Номер станции	$P_{г\text{у}}$, г сух. массы/м ²		$P_{г\text{н}}$, г сух. массы		$D_{г\text{у}}$, г сух. массы		$C_{г\text{у}}$, %	
	1968	1969	1968	1969	1968	1969	1968	1969
<i>B. bicaudatus</i>								
1	1,96	1,95	1215	1209	1342	1990	110	165
2	1,18	1,07	8125	7475	2137	2621	26	35
3	2,13	1,76	28369	24202	1085	4381	3,8	18
<i>O. sigma</i>								
1	1,28	1,29	7936	7998	30	134	0,4	1,7
2	3,85	3,47	30544	28318	2567	2318	8,4	8,2
3	4,30	3,31	71410	59776	5987	1335	8,4	2,2

Примечание. $P_{г\text{у}}$ и $D_{г\text{у}}$ приведены по Пирсону и Крамеру [Pearson, Kramer, 1972], остальные параметры рассчитаны В.В. Богатовым по материалам этих авторов.

станциях оказалось не столь резко выраженным (рис. 2.69, 2). Очевидно, что особенности сезонного перераспределения личинок *B. bicaudatus* в основном соответствуют гипотезе «колонизационного цикла» Мюллера [Müller, 1954], тогда как более умеренный тип перераспределения личинок *O. sigma* в большей степени подходит к гипотезе «компенсирующей продукции» Уотерса [Waters, 1961]. Сопоставляя сезонную динамику миграций исследованных двух видов личинок, можно было бы ожидать массовый лет имаго *B. bicaudatus* к верховьям Темпл Фок и отсутствие такового у *O. sigma*. Однако на практике картина оказалась обратной: именно у имаго *O. sigma* наблюдался массовый лет к верховьям, в то время как у имаго *B. bicaudatus* на участках вылета отмечалось лишь роение в утренние часы [Pearson, Kramer, 1972]. Вероятно, механизмы колонизационных циклов и продукционные процессы в речных бентосных сообществах не имеют четко выраженной взаимосвязи, при этом соответствующие гипотезы («колонизационных циклов» Мюллера и «компенсирующей продукции» Уотерса) нет необходимости противопоставлять друг другу. Скорее всего, их следует считать взаимодополняющими.

Несомненно, высокая плотность организмов, особенно при массовом отрождении молоди, а также активный рост гидробионтов относятся к важнейшим факторам, содействующим дрейфу. В то же время, по-видимому, не существует какого-либо доминирующего фактора, определяющего дрейф гидробионтов (рост гидробионтов, циркадные ритмы, гидрологические и химические факторы, случайные воздействия и т.п.). Причины и факторы, определяющие

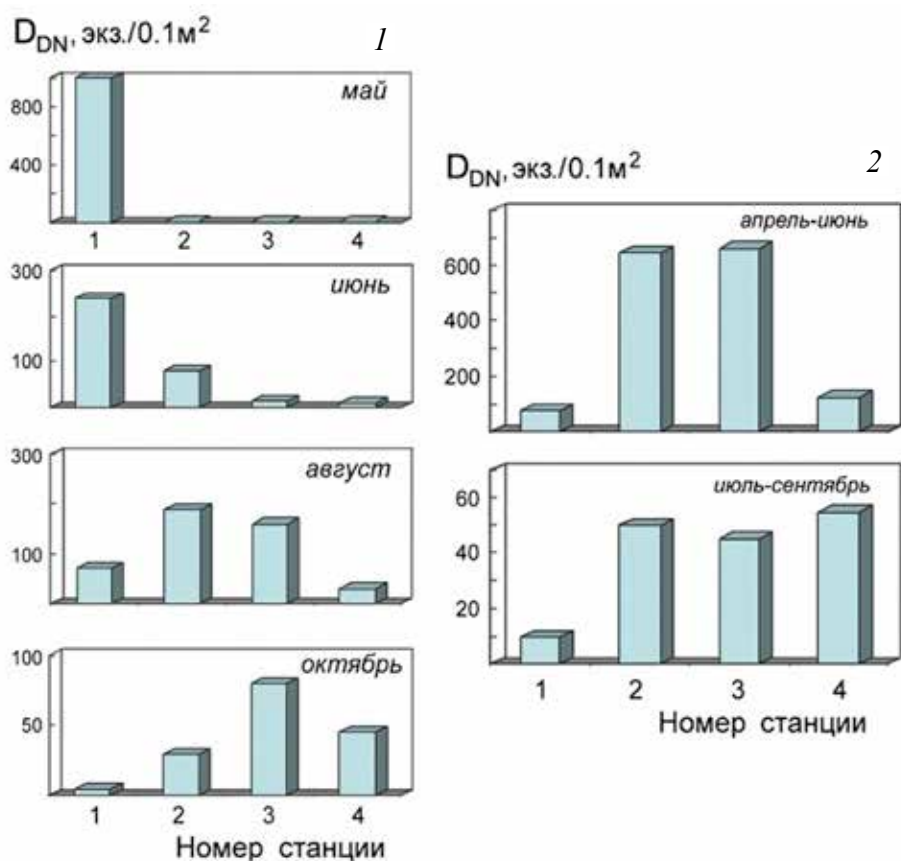


Рис. 2.69. Сезонная динамика плотности (D_{DN} , экз./0,1 м²) *Baetis bicaudatus* (1) и *Oligophlebodes sigma* (2) на станциях наблюдений в верховьях р. Темпл Фок (Юта, США). По материалам Пирсона и Крамера [Pearson, Kramer, 1972]

уровень дрейфа, могут быть разные не только у разных видов, но и у отдельных размерных групп гидробионтов, и даже у одних и тех же по размеру организмов. Причем одни и те же особи в определенных условиях могут вести себя по-разному. Не исключено, что отдельные беспозвоночные – участники дрейфа – способны несколько раз за сутки подниматься в толщу воды в поисках подходящих биотопов, в то время как некоторая часть особей вообще может не участвовать в дрейфе. По крайней мере, известно, что, например, молодь речных полупроходных и жилых видов рыб четко разделяется на две группы – участвующие и не участвующие в покатной миграции [Павлов и др., 2007]. На сходное поведение многих донных беспозвоночных указывает то обстоятельство, что даже у самых активных видов-мигрантов на верхних участках жизненного пространства все равно остаются особи, которые именно здесь завершают свой цикл развития [Богатов, 2005].

2.5. БАЗОВЫЕ И ЧАСТНЫЕ КОНЦЕПЦИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЕЧНЫХ ЭКОСИСТЕМ

В мировой литературе опубликованы работы, подводящие итоги изучению экологии речных сообществ на разных этапах их исследования [Жадин, 1940, 1948; Беклемишев, 1956; Odum, 1957; Illies, Botosaneanu, 1963; Hynes, 1970; Vannote et al., 1980; Barner, Minshall, 1983; Minshall et al., 1985; Davies, Walker, 1986; Statzner et al., 1988; Богатов, 1994; Allan, 1995; Cushing et al., 1995, 2006; Townsend, 1996; Dudgeon, 1999, 2010; Cushing, Allan, 2001; Wetzel, 2001; Gregory et al., 2003; Stanford et al., 2005; Benke, Cushing, 2005; Dodson, 2005; Шубина, 2006; Крылов, Бобров, 2007; Thorp et al., 2008; Tockner et al., 2009; Есин и др., 2009; Pennington, Cech, 2010; Gido, Jackson, 2010; Likens, 2010; Benke, Cushing, 2010; Dodds, Whiles, 2010; Протасов, 2011; Алимов и др., 2013; Богатов и др., 2013; Dodds et al., 2015; Ensing et al., 2017; и мн. др.]. Полученные результаты позволили сформулировать представления о закономерностях функционирования речных экосистем и формирования их структуры. Среди базовых и частных концепций к настоящему времени можно выделить:

- концепцию речного континуума;
- дисконтинуальные модели речных сообществ, в том числе концепцию динамики пятен/ячеек;
- комбинированную концепцию организации речных сообществ;
- концепцию синтеза речных и прибрежных экосистем;
- вспомогательные концепции, учитывающие влияние на речные сообщества отдельных природных факторов, в том числе предлагаемую авторами книги дренажно-транзитную концепцию, определяющую функциональную значимость водосборных бассейнов при формировании речного континуума;
- концепцию градиента речного биома.

В данной главе предпринята попытка систематизации имеющихся представлений, что позволило обозначить наиболее значимые характеристики речных экосистем как целостных природных комплексов.

2.5.1. Концепция речного континуума

Среди общих концепций, посвященных особенностям функционирования речных экосистем, наибольшую популярность среди специалистов получила концепция речного континуума (КРК; *the river continuum concept*), в которой обосновано влияние увеличения размера водотока на изменение структурно-функциональных характеристик речных сообществ (рис. 2.70) [Vannote et al., 1980].

В соответствии с КРК, в верховьях рек, водосборы которых покрыты лесом, экосистемы затенены пологом деревьев и получают мало света. Летние среднемесячные температуры воды невысоки, например в умеренных широтах

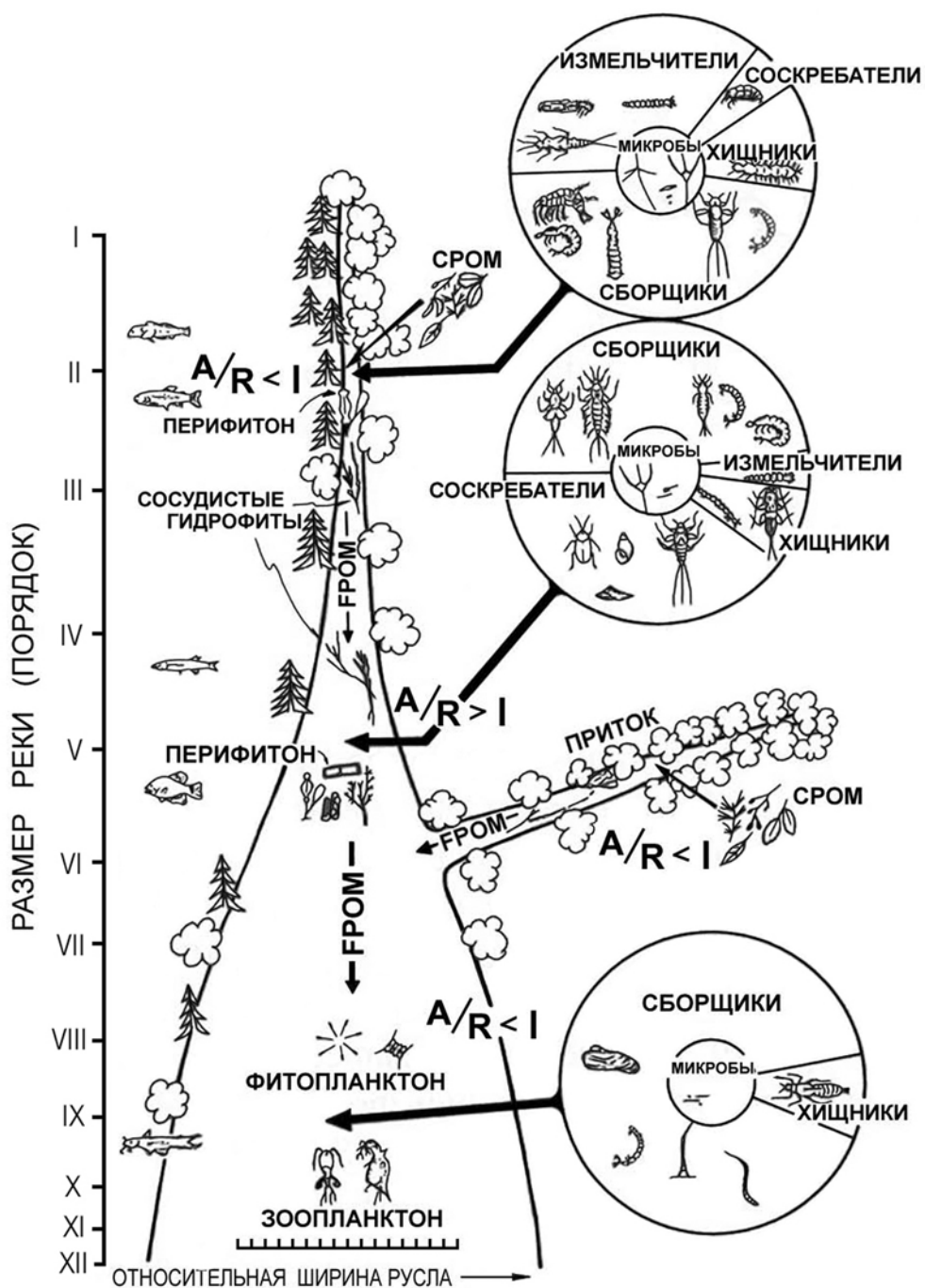


Рис. 2.70. Схема речного континуума. Предполагаемая взаимосвязь между размером потока и поступательными изменениями структурно-функциональных признаков лотических сообществ. Объяснения в тексте. Из: [Vannote et al., 1980]

редко превышают 8–12°. Отношение первичной продукции (A) к деструкции (R) органических веществ здесь значительно меньше единицы, что указывает на гетеротрофный тип метаболизма экосистемы. Первичные консументы на этом участке питаются в основном аллохтонным органическим веществом (листовой опад, древесный мусор и пр.) и связанными с ним бактериями. Беспозвоночные представлены главным образом механическими измельчителями опада и сборщиками детрита. В водном потоке преобладают грубые макрочастицы в виде СРОМ (см. раздел 2.3).

Ниже по течению река становится шире, изменяется ее температурный режим, речная экосистема не затенена деревьями и меньше зависит от аллохтонной органики. В потоке все большее значение имеет тонко- и ультратонкоизмельченное органическое вещество (FРОМ и UРОМ), а в сообществе консументов доминируют соскребатели перифитона, бентосные фильтраторы и сборщики (на рис. 2.70 бентосные фильтраторы и сборщики объединены в общую группу «сборщики»). Биотическое разнообразие беспозвоночных на таких участках максимально. Считается, что экосистема здесь автотрофна, а отношение A/R либо больше [Vannote et al., 1980], либо несколько меньше единицы [Богатов, 1995; Dodds, 2002].

На равнинных участках рек течение замедляется, вода, как правило, становится мутной, что ослабляет процессы фотосинтеза. В толще воды появляются планктонные организмы, однако на большинстве трофических уровней видовое разнообразие снижается и экосистема вновь становится гетеротрофной.

В верховьях рек, протекающих по безлесной местности, количество основных трофических групп сокращается в основном за счет отсутствия или резкого снижения роли потребителей листового (травяного) опада, однако последующий континуум трофических группировок сохраняется [Minshall et al., 1985]. При этом трофическая структура беспозвоночных в водотоках I порядка безлесной зоны примерно соответствует таковой в водотоках IV порядка лесной зоны (рис. 2.71).

Проведенные гидробиологами из Биолого-почвенного института ДВО РАН (ныне Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН) исследования показали, что основные черты речного континуума оказались свойственны и рекам Дальнего Востока России [Леванидова, 1986; Вшивкова, 1988; Леванидова и др., 1989; Богатов, 1994; Богатов, Никулина, 2009; Богатов и др., 2010; и др.]. Как и в других речных бассейнах мира, водосбор которых покрыт лесом, в верховьях рек значительную долю в биотическом балансе гидробионтов составляет аллохтонное органическое вещество в виде листового опада и другого органического детрита. Затем, по мере удаления от истоков реки, все большее значение в пищевых сетях приобретает автохтонная органика. Соответственно изменяется трофическая структура бентосного сообщества в сторону уменьшения доли «измельчителей»



Рис. 2.71. Ожидаемые изменения в соотношении функциональных трофических групп вдоль речной системы. Из: [Minshall et al., 1985]

при одновременном увеличении доли «сборщиков» и «фильтраторов». Ближе к равнинным участкам рек в водной толще появляются планктонные сообщества.

2.5.2. Дисконтинуальные модели речных сообществ

Как было показано во вводной части раздела 2, еще задолго до опубликования КРК все текущие воды бореальной зоны Земли по эколого-гидрологическим характеристикам разделяли и продолжают разделять на креналь, ритраль и потамаль [Illies, 1953; Illies, Botosaneanu, 1963]. К кренали относят область родникового ручья, к ритрали – примыкающую к роднику часть водотока с каменистым или гравийно-галечниково-валунным грунтом, высокой скоростью течения, насыщенной кислородом водой и летними среднемесячными температурами до 20°. К потамали относят примыкающую к ритрали нижнюю часть водотока с песчаным, заиленным или илистым грунтом, сравнительно небольшой скоростью течения, летними среднемесячными температурами выше 20° и с частыми проявлениями дефицита кислорода. Иногда в пределах кренали выделяют родник (зукреналь) и родниковый ручей (гипокреналь). В свою очередь, ритраль и потамаль разделяют на части, каждая из которых соответствует участкам рек, к которым приурочено местообитание определенных групп рыб: эпиритраль (верхний форелевый участок), метаритраль (нижний форелевый участок), гипоритраль (хариусовый участок), эпипотамаль (усачевый участок), метапотамаль (лещевый участок) и гипопотамаль (ершово-камбальный участок).

Дальнейшее детальное изучение речной биоты в каждой из выделенных зон позволило говорить об определенной условности положений КРК.

В частности, некоторые исследователи обратили внимание на гидравлическую составляющую водного потока [Statzner, Higler, 1986; Statzner, 1987; Statzner et al., 1988]. Отмечено заметное повышение видового богатства в зоне перехода кренали в ритраль и на участках появления излучин и пойменных водоемов (рис. 2.72). Такие изменения видового разнообразия авторы дисконтинуальной модели объясняли перепадами гидравлического давления, обусловленного

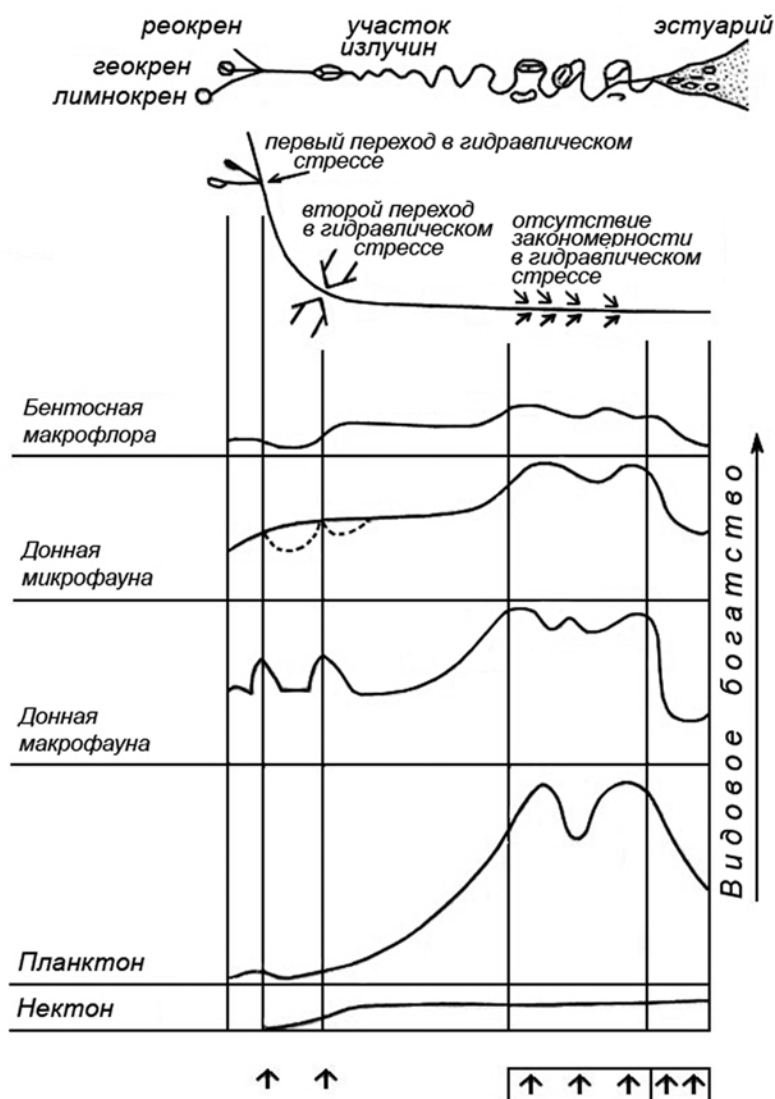


Рис. 2.72. Характеристики проточных экосистем. Стрелки вверх указывают на участки водотока, где показатели параметров среды подвержены относительно высоким изменениям; стрелки вниз – на участки, где отмечается резкая смена видового состава гидробионтов. Из: [Statzner, 1987]

изменениями расхода воды и градиента уклона в переходных зонах речной системы [Statzner, 1987; Statzner et al., 1988]. Например, обращалось внимание на дисконтинуальность абиотических факторов, в частности при слиянии притоков. В результате была сформулирована гипотеза динамики речной сети (*network dynamics hypothesis*) [Benda et al., 2004], как более совершенная модель, для объяснения распределения речных организмов. В то же время заметим, что примененный в данной работе сетевой подход (теория сетей) по отношению к объяснению структуры биотических сообществ и экосистемных процессов находится еще в стадии становления.

В качестве основной альтернативы КРК была выдвинута концепция динамики пятен/ячеек – КДП (*the patch dynamics concept*), которая акцентирует внимание исключительно на дискретном характере речных экосистем [Townsend, 1989]. Действительно, речные системы неоднородны по составу и динамичны во времени. Они явно разнородны по гидрологическим условиям, таким как режим потока, размер частиц субстрата и ресурсов (мертвое органическое вещество, прикрепленные водоросли, жертвы). В соответствии с КДП организацию речных сообществ определяют временные и, чаще всего, случайные элементы контроля ниш. Постулируется, что постоянные изменения среды обеспечивают большее разнообразие, например, когда экологически сходные виды функционируют в разные сезоны (контроль ниши посредством временных различий в потреблении ресурса). Кратковременные нарушающие воздействия могут повысить возможности сосуществования видов и их разнообразие. При этом уменьшается вероятность конкурентного исключения (через аннулирование конкурентного преимущества), особенно если какие-либо процессы дают видам преимущество при низкой плотности [Chesson, 1986].

В КДП утверждается, что в неоднородной среде и в условиях нарушающих воздействий особое значение приобретает масштабное рассеивание гидробионтов в пространстве (колонизация новых субстратов) [Townsend, 1989]. Даже в тех случаях, когда роль конкуренции или хищничества очевидна, временные явления – нарушение структурно-функциональной упорядоченности и колонизация – также имеют существенное значение. В большинстве ситуаций случайные факторы становятся лидирующими, а виды с возможностями масштабного расселения (например, активный дрейф бентосных организмов или покатные миграции рыб) составляют отличительную особенность водотоков.

Решающая роль в КДП отведена рефугиумам (убежищам) как потенциальным источникам гидробионтов при их переколонизации после наводнений. Подобные рефугиумы рассматриваются в качестве буфера против частых экстремальных воздействий, направленных на разрушение речных сообществ. В целом, модель динамики пятен показывает теоретические возможности сосуществования видов со сходным образом жизни в условиях временных (приходящих) явлений.

2.5.3. Комбинированная концепция

Соотношение континуальности (КРК) и дискретности (КДП) при оценке структурно-функциональных характеристик речных экосистем не может рассматриваться лишь с позиции альтернативности двух концепций [Богатов, 1995]. Если же отмечать роль рефугиумов/убежищ в формировании видового разнообразия конкретных речных сообществ, то, несомненно, они во многом обеспечивают их уникальность, способствуя повышению разнообразия речной биоты [Sedell et al., 1990]. Понятно, что в любой речной системе рефугиумы расположены случайным образом. Однако по мере продвижения от истоков к зоне ритрали количество и разнообразие таких рефугиумов обычно увеличиваются, и, таким образом, увеличивается вероятность появления новых групп гидробионтов. Например, в континууме р. Начилова (западная Камчатка) количество рефугиумов в виде заломов в основном русле (*беспорядочное скопление на реке деревьев, вымытых и снесенных течением, образующих в узких местах реки плотины в виде беспорядочно наваленных друг на друга стволов*) закономерно изменяется от истоков к устью [Есин, Чалов, 2011]: минимальное количество заломов характерно для верховьев, максимальное – для среднего течения (рис. 2.73). Известно, что именно в заламах могут концентрироваться многие группы зообентосных организмов и рыб [Benke et al., 1985; Benke, 2001; Есин, Чалов, 2011; и др.].

Таким образом, отмечаемая в КРК более высокая степень видового разнообразия в ритрали во многом, по-видимому, обеспечивается наличием здесь

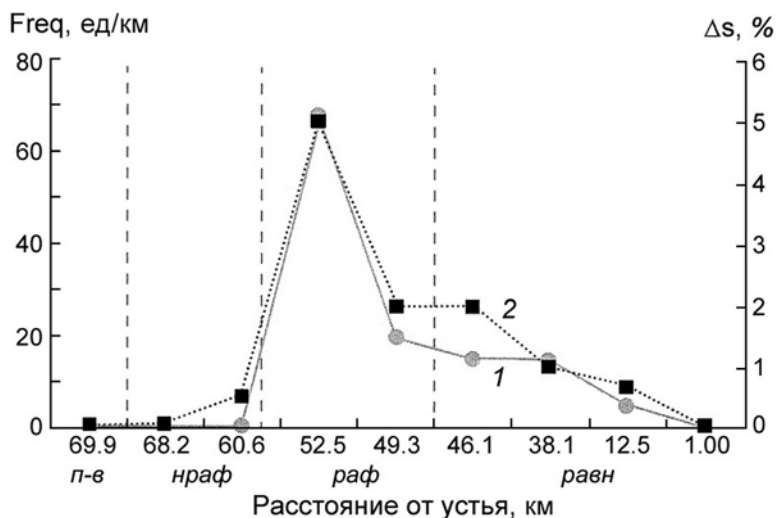


Рис. 2.73. Изменение частоты заломов (1, Freq) и их доли от акватории русла (2, Δs) в континууме р. Начилова (западная Камчатка). Типы русла: *п-в* – горное порожисто-водопадное, *нраф* – с неразвитыми аллювиальными формами, *раф* – с развитыми аллювиальными формами, *равн* – равнинное. Из: [Есин, Чалов, 2011]

более многочисленных и разнообразных убежищ по сравнению с зоной крениали. Аналогичным образом указанное Штацнером [Statzner, 1987] увеличение видового богатства в зонах «гидравлического стресса» также в какой-то степени может быть связано с появлением качественно новых рефугиумов. Очевидно, что биотопы-рефугиумы содействуют функционированию речной системы, частью которой они являются. И хотя их изначальное расположение определяется случайными факторами, в результате взаимодействия приуроченных к таким рефугиумам сообществ гидробионтов может возникать внутренняя организация речной биоты, проявляющаяся в образовании континуума интегральных характеристик сообществ, например таких как отношение продукции к деструкции органических веществ, соотношение трофических уровней/групп, изменения индексов разнообразия и т.п.

Предложенные базовые концепции – речного континуума и динамики пятен, объясняющие с разных позиций особенности функционирования лотических экосистем, следует, очевидно, рассматривать не только как взаимодополняющие друг друга, но и как неразрывно связанные между собой [Богатов, 1994]. Это позволяет полнее и реалистичнее оценивать естественное состояние речных природных комплексов и создает предпосылки для более точного прогнозирования изменения такого состояния, в том числе в результате антропогенных воздействий. Таким образом, можно говорить о необходимости формирования комбинированной концепции функционирования речных сообществ. В этом плане полезно вспомнить точку зрения фитоценологов о единстве непрерывности и дискретности растительного покрова, по которой свойства непрерывности и дискретности рассматриваются не дополнительными друг другу, а выраженными одновременно и всюду [Ипатов, Кирикова, 1997]. Заметим также, что тенденция синтеза аналогичных альтернативных концепций наметилась и в зооценологии, в основе которой лежит положение о том, что абсолютный континуум и абсолютная дискретность в живой природе не существуют. Причем проблема соотношения континуальности и дискретности живого покрова – это в значительной мере и проблема избранного масштаба исследований, вытекающая из фрактальности пространственной структуры сообществ [Мейен, 1989; Кафанов, 2005]. Например, общая картина распределения речного макробентоса часто представляет собой случайную мозаику в масштабе метров и континуально (или фрактально) организованную иерархию сообществ в масштабах десятков метров–километров.

2.5.4. Концепция синтеза речных и прибрежноречных экосистем

Концепция синтеза речных и прибрежноречных экосистем (КСРПЭ; *riverine ecosystem synthesis*) [Thorpe et al., 2008] представляет собой комплексную систему взглядов и моделей, описывающую структуру и функционирование прибрежноречных ландшафтов и экосистем. В своей основе концепция опирается

на базовые положения речной экологии и геоморфологии в свете пространственно-временных измерений окружающей среды. В концепции отмечено, что отдельные гидрогеоморфологические участки речной экосистемы различаются по характеру естественного режима потока в соответствии с разными временными масштабами: более 100 лет, в пределах 1–100 лет и менее 1 года. Не удивительно поэтому, что различные экологические процессы по-разному соотносятся с временной шкалой выделенных режимов.

В КСРПЭ особая роль отводится гидрологическим и геоморфологическим процессам, участвующим в формировании так называемых функциональных зон (*functional process zones*), включающих такие объекты, как, русло в узком горном ущелье (*gorge*); армированное русло – тонкозернистые отложения, перекрытые слоем обломочного материала (*armored*); свободно меандрирующее русло (*meandering*); протяженный плес (*pool*); деформируемое подвижное русло (*mobile*); речное русло с протокой (*anabranch*); многорукавное русло (*distributary*) и т.п. Причем, как особо подчеркивают авторы концепции, слово «*functional*» в большей степени связано не с экологическими, а с гидрологическими и геоморфологическими процессами.

Для разных речных бассейнов мира речная сеть показана в виде схематического изображения основных функциональных зон в продольном профиле реки (рис. 2.74). Для каждой из функциональных зон предсказаны гидрологические (водный, паводковый и исторический режимы потока) и экологические условия (длина пищевой цепи, спиралинг питательных веществ, разнообразие видов).

В прямоугольнике рядом с каждой функциональной зоной показаны: относительная значимость гидрологических характеристик на круговых диаграммах с точки зрения водного (*R*), исторического (*H*) и паводкового (*P*) режимов; относительная сила связи, иллюстрированная стрелками: вертикальные связи – пунктирной стрелкой, боковые связи между затопляемой частью русла (*riverscape*) и затопляемой частью поймы (*floodscape*) – серой стрелкой, связи между верхними и нижними участками реки – синей стрелкой (интенсивность гидрологических и вещественных взаимосвязей для подземных и поверхностных вод выражена толщиной стрелок); экологические условия, показанные цветными кубиками на вертикальной размерной шкале: длина пищевой цепи (*FCL*), спиралинг питательных веществ (*NS*), разнообразие видов (*SPD*). Изменения для первых двух экологических условий рассматриваются от длинных до коротких, а для видового разнообразия – от низких до высоких. Светлая полоса внутри каждого кубика показывает ожидаемое среднее значение, закрашенная – оцененный диапазон условий (из: [Thorpe et al., 2008]).

Очевидно, что концепция функциональных зон, как одна из форм ландшафтного зонирования, может быть неплохо согласована с парадигмой разделения речного русла на функциональные зоны по составу гидробионтов Иллиеса–Ботосанену [Illies, Botosaneanu, 1963]. Учитывая, что речные гидробионты,

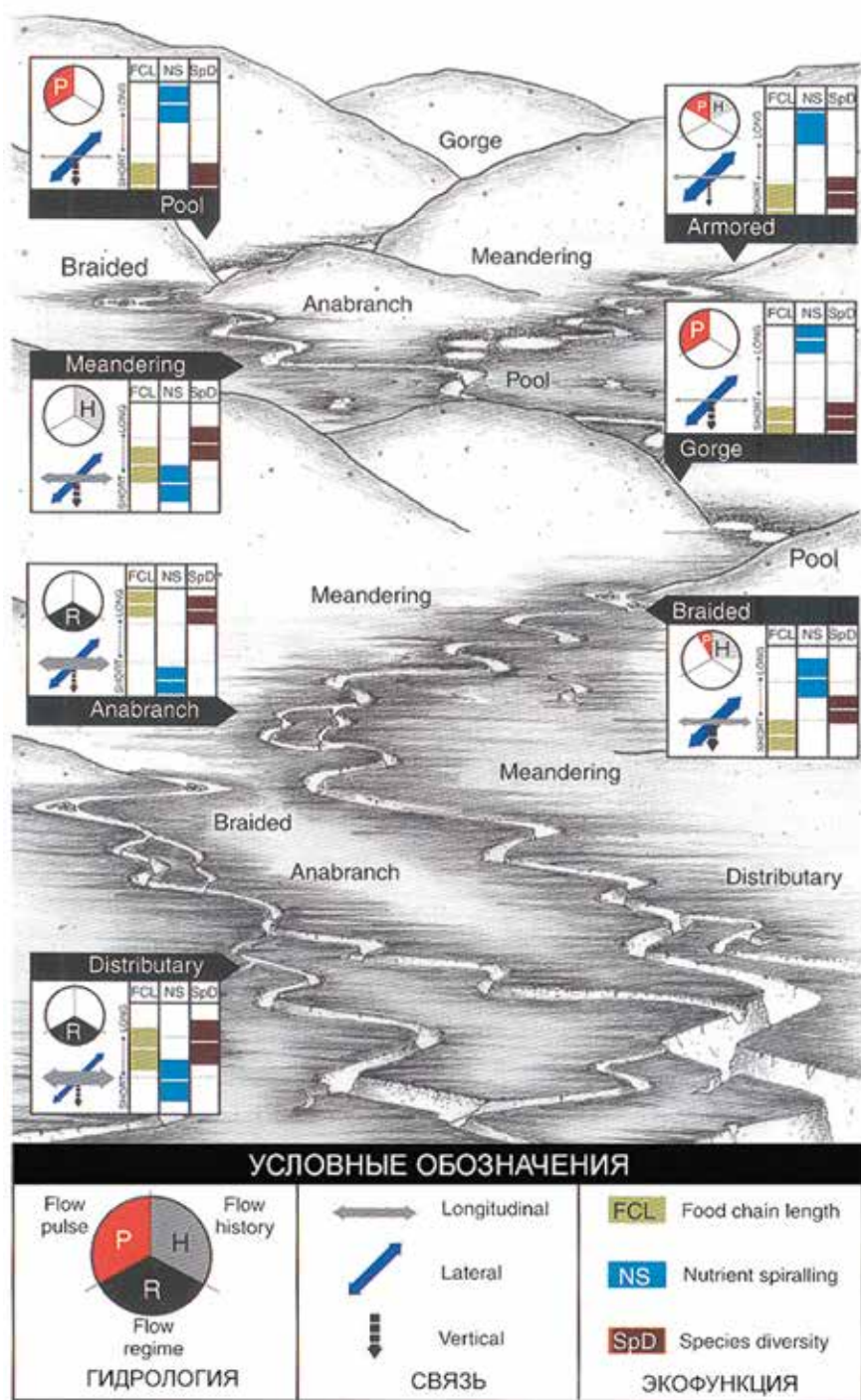


Рис. 2.74. Концептуальная схема речной системы с условным расположением функциональных зон в продольном профиле реки (пояснения в тексте)

в том числе рыбные сообщества, являются интегральными биоиндикаторами состояния водосборных бассейнов, сопоставление и синтез данных концепций могли бы открыть новый взгляд на иерархию речных сообществ и экосистем.

2.5.5. Вспомогательные концепции

Как отмечал Маргалеф: «Догматические исходные гипотезы, будучи санкционированными, становятся неприкасаемыми... и требуют введения множества вспомогательных концепций» [Маргалеф, 1992, с. 10]. При обсуждении границ применимости ключевых положений КРК и КДП развитие получили многочисленные частные концепции, исследующие влияние или взаимодействие отдельных факторов и/или ситуаций, позволяющих дополнительно оценить «прочность» базовых концепций. В частности, в наиболее ранних моделях функционирования речных экосистем подчеркивалась экологическая значимость стабильных гидрологических условий потоков. Однако с публикацией в 1989 г. концепции пульсирующих наводнений (КПН, *flood-pulse concept*) стала очевидной решающая роль паводков в регуляции экологических процессов [Junk et al., 1989]. В частности, в КПН затопление поймы рек связывалось в основном с формированием пищевых сетей, особенно в речных системах высокого порядка. Сезонность и степень затопления поймы были отнесены к фундаментальным факторам, определяющим организацию речной экосистемы. Авторы КПН считают, что в условиях частых паводков изменения продольных параметров водотоков должны терять свое значение. При этом подчеркивалось, что пищевые сети в крупных реках практически не подпитываются FROM, поступающим с верхних участков реки, а энергетически поддерживаются экспортом перегнивающего наземного детрита с затопленных участков поймы и макрофитов из пойменных озер.

В отличие от КПН, была обоснована модель прибрежной продуктивности (*riverine productivity model*), в которой подчеркивается важность автохтонного органического вещества в развитии пищевых сетей в крупных реках [Thorp, Delong, 1994, 2002]. Основная идея концепции заключается в том, что фито-планктон и донные водоросли являются важнейшим источником органического вещества для речных пищевых сетей, так как их высокая лабильность (легкая усвояемость) и продуктивность способны компенсировать иногда более высокую массу в основном грубого органического вещества, поступающего с верхних участков большой реки или его импорта с затопленной части поймы в период паводков.

В качестве развития КПН была сформулирована парадигма природного режима стока (*the natural flow regime*) [Poff et al., 1997], в которой сохранение естественного гидрологического режима рек считается важнейшим фактором поддержания разнообразия лотических экосистем. На особую значимость

периодических наводнений для поддержания высокого разнообразия реофильных сообществ было обращено внимание при изучении речных экосистем зоны муссонного климата [Богатов, 1994, 1995]. В проведенных исследованиях было подчеркнуто, что естественные динамические гидрологические циклы (чередование паводков и засушливых периодов) являются необходимым условием для поддержания сложившегося биологического разнообразия речных сообществ.

Кроме перечисленных выше концепций, можно также отметить частные модели прибрежного наземного влияния (*riparian influence*) [Cummins et al., 1989; Gregory et al., 1991; Cummins, 2002], поскольку воздействия прибрежных наземных экосистем на структуру и функции речных биоценозов являются уникальными и значительными [Gregory et al., 1991]. Например, отсутствие затенения на участках рек гетеротрофной зоны приводит к их эвтрофикации и развитию сообществ соскребателей перифитона [Minshall, 1978], а различия в составе прибрежной растительности могут повлиять на оборот грубых макрочастиц органических веществ [Grubbs, Cummins, 1996]. Ранее было показано, что интенсивность оборота питательных веществ также может быть связана с составом наземной растительности. В частности, в северных реках США самые высокие уровни рециркуляции питательных веществ были отмечены в потоках, протекающих среди восточных лиственных лесов, а наиболее медленные – среди западных хвойных лесов [Minshall et al., 1983]. В одном из исследований Доддса с соавторами [Dodds et al., 2017] было показано существенное влияние корневой системы прибрежных деревьев и кустарников на газовый режим ручьев Бразилии.

2.5.6. Дренажно-транзитная концепция

Исторически сложившиеся ландшафты, как целостные системы, способны оказывать воздействие на формирование биологического разнообразия речных экосистем. Показательны в этом плане результаты изучения связи видового разнообразия водорослей с площадью речного бассейна для рек горно-лесной зоны южной части Дальнего Востока России, проведенные Богатовым с соавторами [Богатов, Никулина, 2010; Богатов и др., 2013]. Основные работы осуществлялись в бассейне р. Комаровка (левый приток р. Раздольная, юг Приморского края; площадь бассейна – 1490 км², длина реки – 67 км, средний уклон – 5,8 ‰). Река имеет горный, предгорный и равнинный участки. Исследуемая территория входит в область умеренного климата средних широт с интенсивной циклонической активностью и выраженными признаками муссонной тенденции [Хромов, 1956; Федоровский, 1985]. На водосборе Комаровки произрастает хвойно-широколиственная древесная, разнообразная кустарниковая и травяная растительность. Верхняя часть бассейна расположена в пределах Уссурийского заповедника, покрыта смешанными широколиственно-кедровыми

и широколиственно пихтово-еловыми лесами. В нижней части бассейна произрастают редкие дубовые леса, значительная часть пологих склонов распахана.

Всего в Комаровке обнаружено 333 вида и 412 таксонов водорослей, причем в истоке реки было отмечено минимальное число таксонов (9), а максимальное (189) – на станции, расположенной в 16 км от истока (рис. 2.75). На водосборной площади Комаровки в пределах первых 60–70 км² (рис. 2.76) наблюдалось заметное увеличение таксономического богатства водорослей (в среднем по 8–9 таксонов на 1 км длины реки), причем наиболее быстрое суммарное увеличение разновидностей и форм водорослей (около 60 таксонов на 1 км длины реки) наблюдалось в пределах первых 20 км² водосбора (рис. 2.76, 2). По мере возрастания площади бассейна свыше 70 км², темпы увеличения таксономического богатства резко снижались и на графике представляли собой слабо наклоненную к оси абсцисс прямую линию (рис. 2.76, 1). В целом, связь числа таксонов водорослей (D_{alg} , экз.) с водосборной площадью р. Комаровка (S , км²) описывается уравнением [Богатов, Никулина, 2010]:

$$D_{alg} = 92,72 S^{0,199}; R^2 = 0,98. \quad (2.1)$$

Таким образом, уже в самой верхней части бассейна Комаровки наблюдается заметное насыщение речной экосистемы таксонами.

Из рис. 2.77, на котором приведен график изменения

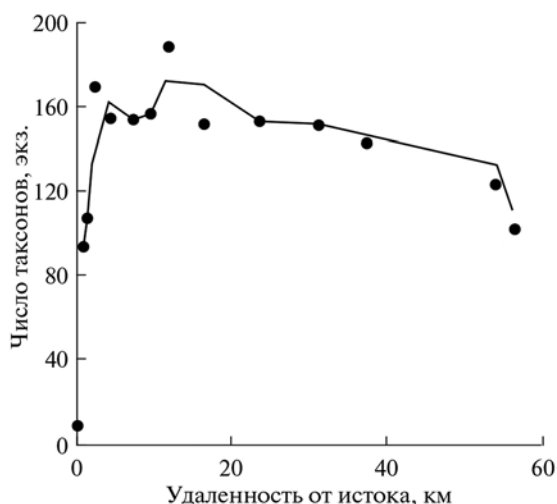


Рис. 2.75. Число таксонов водорослей на альгологических станциях (обозначены точками) в продольном профиле р. Комаровка. Из: [Богатов и др., 2013]

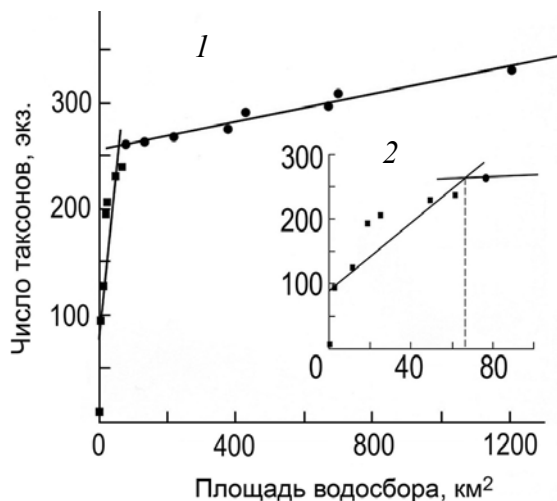


Рис. 2.76. Зависимость между суммарным числом таксонов водорослей и размером площади водосбора р. Комаровка (1); 2 – то же при площади водосбора до 100 км². Из: [Богатов и др., 2013]

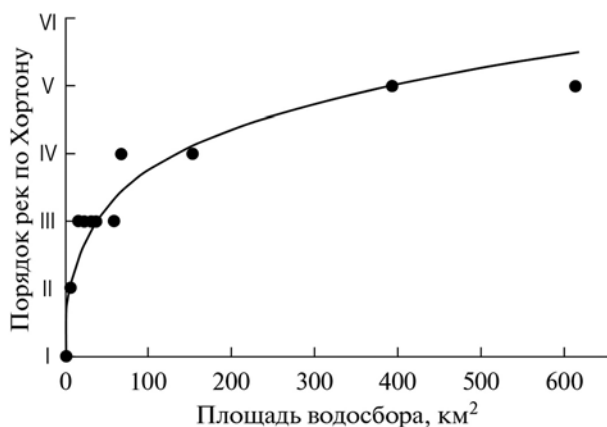


Рис. 2.77. Зависимость порядка речной системы в бассейне р. Комаровка от площади водосбора.

Из: [Богатов и др., 2013]

нообразие которых интенсивно растет в диапазоне рек I и II порядков, замедляется на реках III порядка и далее на реках IV и V порядков практически не меняется (рис. 2.75, 2.77).

Было отмечено, что с увеличением размера реки заметно меняются ее морфологические характеристики. Так, на рис. 2.78 показана зависимость уклона тальвега русла от размера водосбора. Видно, что уклоны тальвегов русел рек резко снижаются (от 73 до 20 ‰) в диапазоне площадей водосборов от 0,14 до 20 км². Причем, как показано выше, именно на данном участке реки, соответствующей площади водосбора до 20 км², происходит наиболее быстрое нарастание таксономического разнообразия водорослей. В дальнейшем спад уклона тальвегов р. Комаровка замедляется (рис. 2.78).

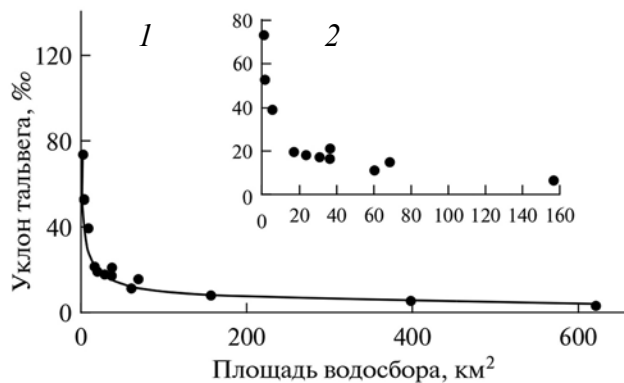


Рис. 2.78. Зависимость уклона тальвега рек от размера площади водосбора р. Комаровка (1); 2 – то же в более крупном масштабе. Из: [Богатов и др., 2013]

порядков рек в речной системе Комаровки с ростом площади водосбора, видно, что в верховьях мощность речной системы нарастает быстро, но в районе водосбора в 60–70 км² рост замедляется. Этот участок совпадает с точкой начала резкого замедления роста таксономического состава водорослей с увеличением площади бассейна. Очевидно, что подобная взаимосвязь непосредственно относится к пространственному распределению гидробионтов, раз-

Оценка изменения среднегодовых модулей летне-осеннего стока р. Комаровка с увеличением площади водосбора показала (рис. 2.78), что от истока до площади примерно 20 км² значения модулей стока нарастают наиболее быстро, затем рост сокращается, а примерно с площади 70 км² их значения начинают заметно уменьшаться. Причины снижения модулей стока на

водосборах свыше 70 км² различны. Во-первых, с увеличением размера реки снижается ее относительная дренирующая способность и как следствие относительная водононость, при этом максимальная дренирующая способность в этом районе свойственна рекам с площадью водосбора до 10 км² [Федоровский, 1985]. Во-вторых, из-за снижения абсолютных высот бассейнов и выхода рек в предгорья уменьшается поступление атмосферных осадков и существенно растут потери воды на суммарное испарение. Таким образом, в пределах водосборной площади до 70 км² наблюдается жесткая зависимость как морфогидрологических характеристик реки, так и таксономического разнообразия водорослей от величины водосборной площади. Замедление темпов увеличения таксономического разнообразия гидробионтов в речной системе, наблюдаемое с последующим продвижением вниз по течению, т.е. с увеличением площади речного бассейна, и соответственно водности реки, указывает на границу, за пределами которой речное сообщество переходит в иное состояние, свойственное многоводным участкам рек, в континууме которых проявляется более медленный оборот питательных веществ [Minshall et al., 1983], а изменение структурно-функциональных характеристик биоты имеет более сглаженный вид [Богатов, Никулина, 2010]. Поскольку ранее для горного и полугорного участков р. Комаровка был показан сходный характер изменения видового состава альгосообществ и зообентоса [Богатов и др., 2010], можно говорить об определяющей роли верховьев рек в формировании речного бентосного сообщества в целом.

На примере верховий р. Комаровка была выявлена тесная связь в темпах формирования фитобентосных сообществ с такими морфогидрологическими характеристиками реки, как ее порядок и уклон тальвега русла. В свою очередь, известно, что изменение уклона рек тесно связано с размерами и формами русел рек, составом донных отложений, условиями освещенности. В верховьях малых горных рек преобладают узкие долины, поросшие густой древесной, кустарниковой и травяной растительностью, а каменистые русла с валунами часто засорены упавшими деревьями. Для таких участков характерна слабая освещенность преимущественно рассеянным светом, так как прямые солнечные лучи попадают сюда только при высоком стоянии

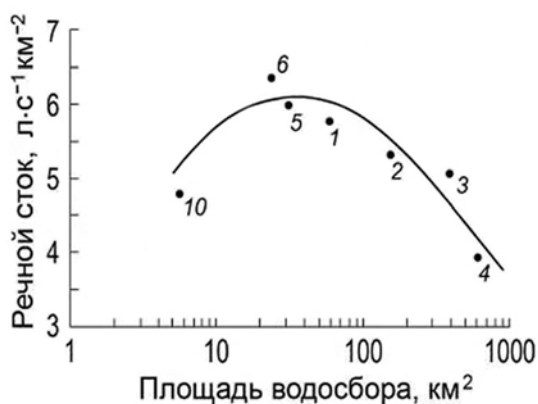


Рис. 2.79. Зависимость среднееголетнего летне-осеннего стока в бассейне р. Комаровка от площади водосбора. Из: [Богатов и др., 2013]

солнца в течение нескольких часов в сутки и в основном перехватываются растительностью. Движение приземного воздуха на данных участках затруднено, его влажность часто находится в состоянии насыщения. Ниже по течению долины расширяются, русла становятся глубже, состав донных отложений меняется на фракции меньшего размера, растительность разреживается. Это улучшает условия освещенности и вентиляции, что оказывает прямое воздействие не только на наземные, но и на речные сообщества.

Известно, что рост порядков рек отражается не только в увеличении площади их водосборов, но и в изменении их роли в переносе воды. В связи с этим Гарцман [1974] предложил разделять все реки по функциональному критерию на две категории: дренажные и транзитные. Дренажными были названы реки, служащие коллекторами избыточной воды на водосборе. К ним относятся преимущественно реки I и II порядков, т.е. малые реки. К транзитным относятся реки более высоких порядков, участвующие в переносе объемов воды, доставляемой дренажными элементами речной сети. Именно дренажные элементы речной сети собирают в распадках приток почвенного и делювиального, а иногда и поверхностного стоков. Распределение среднегодового летне-осеннего стока с водосбора Комаровки подтверждает это положение. Концентрация числа рек I, II порядков на водосборах площадью 20–30 км² наиболее велика, поэтому модули стока, выражающие сток с единицы площади, здесь относительно большие. С ростом размера водосбора в структуре речной сети увеличивается доля транзитных элементов, а часто и бессточных участков, поглощающих сток, и модули стока начинают уменьшаться. Таким образом, сток с водосбора большой реки в замыкающем створе практически равен суммарному стоку малых рек. Отсюда следует фундаментальный вывод: количество и качество вод больших рек определяется исключительно водами малых рек, а рост площади водосбора сам по себе в данном случае играет второстепенную роль.

Основываясь на представлениях Гарцмана, мы можем заключить, что в р. Комаровка основное формирование многоводных сообществ фитобентоса происходит в пределах дренажных участков рек. Последующие изменения видового состава альгосообществ, отмеченные в условиях транзитных участков рек, определяются не столько площадью водосбора, сколько изменениями скоростного и температурного режимов воды, что особенно важно при выходе рек на равнину, и соответствующей сменой реофильных сообществ на потамофильные.

Дренажно-транзитная концепция, определяющая функциональную значимость водосборных бассейнов при формировании речного континуума, оказалась применима ко всему горно-лесному региону юга Дальнего Востока России. При этом связь таксономического состава водорослей (D_{alg} , экз.) с величиной водосборной площади других речных бассейнов юга Дальнего

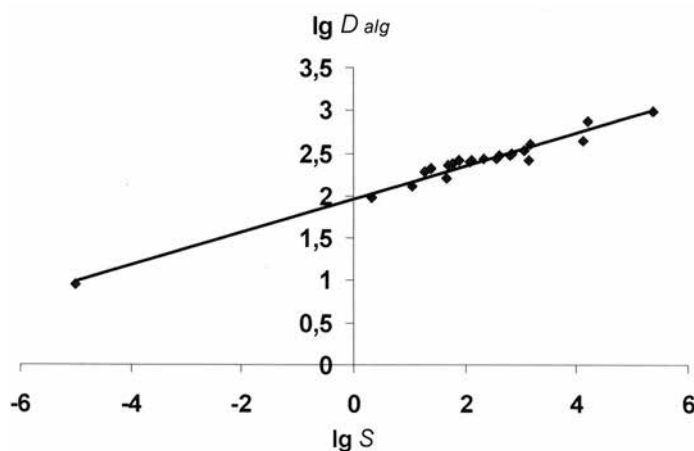


Рис. 2.80. Зависимость между числом таксонов водорослей и площадью бассейна рек юга Дальнего Востока: Бикин, Зева, Кедровая, Комаровка, Нижний Амур, Раздольная и Фроловка. Масштаб логарифмический. Из: [Богатов, Никулина, 2010]

Востока (S , км²), приведенная на рис. 2.80, имеет следующий вид [Богатов, Никулина, 2010]:

$$D_{\text{alg}} = 91,65 S^{0,194}, R^2 = 0,97. \quad (2.2)$$

Нетрудно заметить, что константы в уравнениях (2.1) и (2.2) оказались близки, что указывает на общий для юга Дальнего Востока характер выявленной зависимости. Из полученных уравнений также следует, что если, например, оптимальную для развития перифитонного сообщества площадь бассейна принять за 100 км², то последующее увеличение водосборной площади в 2 и в 10 раз приведет к увеличению таксономического состава водорослей всего в 1,1 и 1,5 раза соответственно.

Таким образом, из всего изложенного выше следует, что формирование континуума речной биоты определяется многими факторами, в том числе величиной дренажной части водосборной площади, в связи с чем предложенная дренажно-транзитная концепция, определяющая функциональную значимость водосборных бассейнов при формировании речного континуума, является важным дополнением к базовым концепциям функционирования речных экосистем.

2.5.7. Концепция градиента речного биома

Недавно Доддсом с соавторами [Dodds et al., 2015] была предложена концепция градиента речного биома (КГРБ; *the Stream Biome Gradient Concept*) как способа предсказания макромасштабных характеристик биоты в текущих водах. Эта концепция основана на гипотезе о том, что многие абиотические

и биотические особенности речных экосистем изменяются предсказуемо по градиентам климата (температура, осадки) из-за прямого влияния климата на гидрологию, геоморфологию и взаимодействия водной биоты с наземной растительностью. КГРБ позволяет гидробиологам понять, каким образом характеристики более хорошо изученного биома могут быть применимы к менее изученному.

Как отмечают авторы КГРБ, речными экологами уже разработано несколько экологических концепций для понимания формирования речных экосистем в широких пространственных и/или временных масштабах. В частности, переходные характеристики речных экосистем через градиент от истоков до крупных рек были связаны с концепцией речного континуума [Vannote et al., 1980]. Эта концепция была разработана для лесных районов, в то же время ее создатели уверены, что различные биомы могут соответствовать концепции речного континуума при условии ее некоторой модификации. Авторы КГРБ обращают внимание на то, что другие синтетические подходы к речной экологии, например концепции пульсирующих наводнений [Junk et al., 1989] и синтеза речных и прибрежноречных экосистем [Thorp et al., 2008], хотя и рассматривают наземные влияния на речные экосистемы, но без акцента на биомы, в которых реки или ручьи протекают. Широкомасштабные подходы (например, крупные бассейны рек, континенты, кросс-биомы) важны для решения многих ключевых экологических проблем [Heffernan et al., 2014], включая такие базисные критерии, как биогенные вещества, биоресурсы [Omernik, 1987], а также географические закономерности формирования сообществ животных в пресноводных экорегионах [Abell et al., 2008]. Несмотря на то что в литературе некоторое внимание и уделялось масштабным изменениям речных систем [например, McCluney et al., 2014], однако до последнего времени мы не имели конкретной модели, с помощью которой можно было бы прогнозировать, как речные потоки изменяются в самых широких масштабах среди разных биомов.

В исследовании Доддса с соавторами [Dodds et al., 2015] градиенты в разных биомах рассматриваются как потенциальные, что позволило предсказать изменения общих характеристик экосистем. При этом за основу прогноза была принята концепция биома Холдриджа [Holdridge, 1947], в которой состояние наземной растительности определяется через климатические градиенты (температура и осадки). Применив биомный подход Холдриджа, авторы КГРБ исследовали возможность по градиентам температуры и осадков предсказуемо контролировать изменения в гидрологии и геоморфологии речных потоков напрямую или по результатам взаимодействия потоков с наземными биомами, доминирующими в определенных климатических условиях. Кроме того, было прослежено, каким образом разные биомы способны ограничить структуру и функцию речных сообществ и экосистем. В частности, из рис. 2.81 следует, что, например, пустыни и леса определяют крайности по градиенту влажности,

от которого, в свою очередь, зависят гидрологические и геоморфологические характеристики ручьев и рек. Очевидно, что предсказания по градиенту от более сухих пустынь через лугопастбищные угодья до более влажных лесов определяют более постоянный речной поток, менее оголенные земли, более низкие скорости эрозии и седиментации, а также снижение значимости вкладов автохтонного углерода в пищевые сети и видовое богатство водных животных. Кроме того, выделены две ключевые характеристики, влияющие на многие свойства речных систем и контролируемые климатом: наличие или отсутствие замкнутого полога растений над водным зеркалом реки и доля открытого грунта в водосборном бассейне (рис. 2.81). Наличие лесного полога определяет пути потока энергии в речных экосистемах и, таким образом, воздействует на структуру сообщества. Там, где полог отсутствует, зависимость от автохтонных продуцентов должна быть больше, в то время как открытый грунт приводит к изменению стока, геоморфологии русла и, в конечном счете, изменению качества воды.

Реки в КГРБ соотнесены с факторами, определяющими некоторые основные аспекты геоморфологии в крупномасштабном биоме. Например, луговая растительность и пожары при взаимодействии формируют особые наземные лугопастбищные биомы. При этом влияние пожаров и выпаса крупных

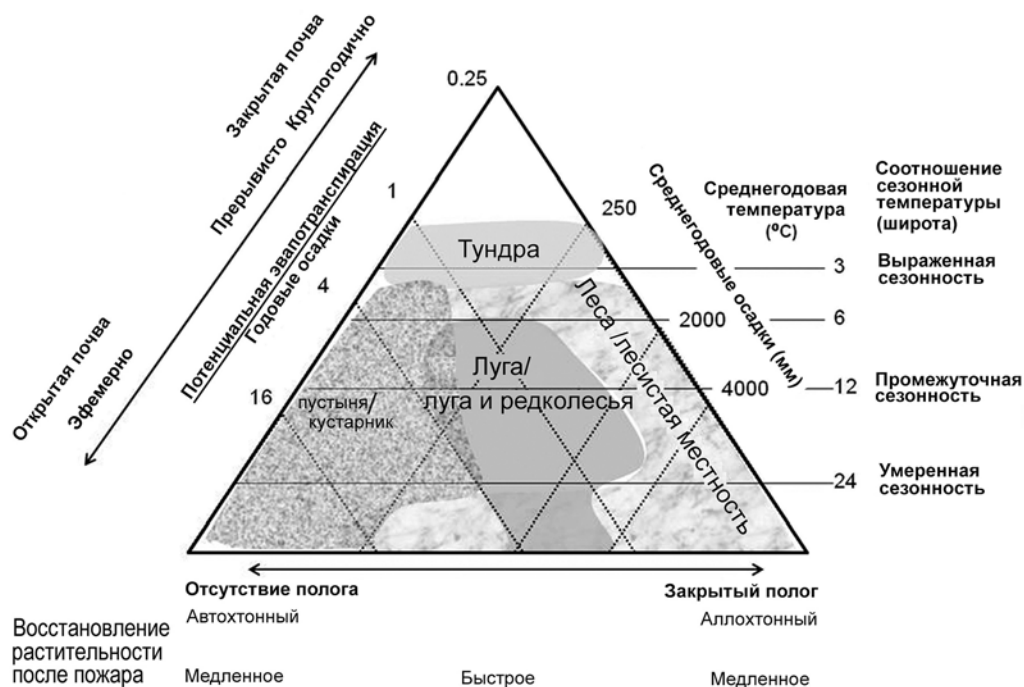


Рис. 2.81. Климатические зоны, типы растительности и их связь с характеристиками потока. Из: [Dodds et al., 2015]; модификация рисунка из: [Holdridge, 1947]

травоядных животных на гидрологию и геоморфологию рек может варьировать в зависимости от градиентов биома и иметь дифференцированный характер (рис. 2.81). Ожидается, что пожары станут фактором, который более регулярно будет влиять на природные луга и менее – на пустынные участки или лесные луга. При этом пожар может быть более катастрофическим по отношению к речным отложениям и питательным веществам в лесных и пустынных системах. Впоследствии пастбищные луга быстро восстанавливаются [Dodds et al., 1996; Larson et al., 2013], в то время как пожары в пустынях и сухих кустарниках уничтожают и без того редкую растительность (предполагается, что плотность растительности достаточна для развития пожара), что потребует много времени для ее регенерации и приведет к размыву почвы [Malmon et al., 2007]. Таким образом, следует ожидать, что природные пожары будут иметь более слабое воздействие на речные системы среди пастбищ, чем в пустынных и лесных районах вдоль градиентов, связанных с изменением количества осадков при постоянной широте или высоте над уровнем моря. Во многих лесах сжигание большого количества растительной биомассы приводит к накоплению значительного количества золы, которая обычно смывается в реки [Ice et al., 2004]. Прибрежная растительность способна стабилизировать берега рек, изменять сток и (в малых реках) влиять на ширину и глубину русла.

Крупные травоядные животные также могут существенно повлиять на геоморфологию ландшафтов во всех биомах [Naiman, Rogers, 1997]. Ожидается, что воздействие крупных копытных на малые реки будет больше

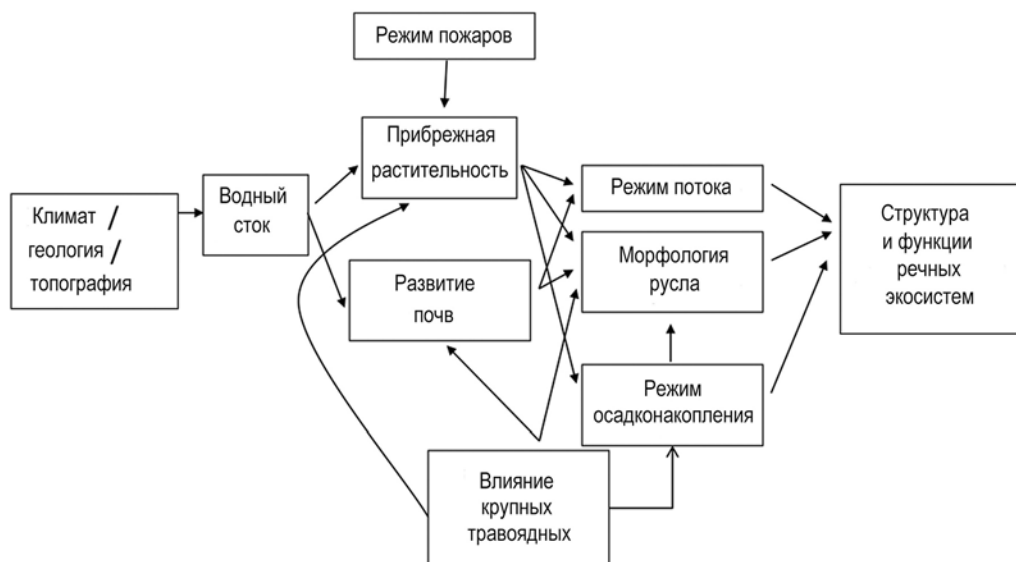


Рис. 2.82. Диаграмма факторов, изменяющихся в зависимости от крупномасштабных градиентов биома и влияющих через гидрологию и геоморфологию потока на структуру и функции речных экосистем. Из: [Dodds et al., 2015]

в лугопастбищных угодьях, чем в лесах или пустынях. Вероятно, пастбищные луга имеют наибольшую естественную плотность крупных травоядных по всему глобальному градиенту биома. Пустынная растительность слишком скудна для поддержки крупных популяций травоядных, а большая часть лесной растительности им недоступна.

Поскольку КРГБ обращается к очень широким биогеографическим моделям, то полученные обобщения не могут быть применимы для небольших масштабов (например, высотные градиенты на островах), хотя некоторые из приведенных в концепции позиций могут быть перенесены на градиенты меньшего масштаба. Многие из обсуждаемых взаимосвязей еще недостаточно изучены во всех природных системах, поэтому сделанные прогнозы и гипотезы основаны только на ограниченной опубликованной информации или широких, хорошо установленных биологических и физических принципах. Очевидно, что понимание исторически сложившихся взаимосвязей между биомами поможет описать эволюционную модель в соответствующих биогеографических масштабах, что, в свою очередь, может быть использовано для расширения других концептуальных моделей речной экологии и откроет возможности для лучшего управления и сохранения речных экосистем в широких масштабах.

2.5.8. Реобиом как открытая природная система

Для обсуждения отличительных особенностей речных экосистем и реобиомов как открытых систем в первую очередь уточним понятие «экосистема». Определим экосистему как динамичный в пространстве и времени природный комплекс, образованный популяциями организмов и средой их обитания и связанный устойчивыми потоками вещества, энергии и информации, обеспечивающими его целостность, структурно-функциональную упорядоченность и управление [Богатов, 1994]. Многие природные системы обычно не имеют четких, фиксированных в пространстве границ [Underwood, 1986], что исключает строгую количественную оценку происходящих в них процессов. Однако все природные экологические системы являются открытыми, что дает нам возможность при количественной оценке, например, потоков энергии задавать этим системам определенные пространственные границы, фиксируя тем самым вход в систему и выход из нее изучаемого потока. Таким образом, пространственные границы экосистемы в каждом конкретном случае могут определяться задачей исследования. Фиксирование пространственных границ внутри некоторой целостности по сути лишь определяет степень открытости (зависимости от внешних факторов) выделяемых систем.

Анализ основных концепций функционирования речных экосистем позволяет акцентировать внимание на общих закономерностях, определяющих взаимосвязь в таких системах физических и биологических параметров как

в пространстве, так и во времени. С позиций существующих базовых концепций все речные природные комплексы представляют собой своеобразные открытые природные системы, в которых события, происходящие на верхних участках, при однонаправленном движении водной массы всегда отражаются на нижележащих сообществах и экосистемах. За счет водного потока осуществляется перенос питательных веществ и продуктов жизнедеятельности гидробионтов. С течением реки связаны дрейф донных организмов и покатные миграции рыб, что способствует расселению гидробионтов, их более полному вовлечению в трофические отношения и оборот питательных веществ на разных участках ареала. Промывной режим горных и полугорных рек не позволяет развиваться планктонным сообществам, лимитирует развитие макрофитов. Воздействия, вызванные подъемами уровня воды, становятся определяющими при формировании речных экосистем зоны муссонного климата. Здесь в периоды крупных паводков за счет механического смыва гидробионтов происходит значительное снижение численности и биомассы бентосных организмов. Причем речные экосистемы благодаря столь динамичным условиям потока способны поддерживать высокий уровень биологического разнообразия [Леванидов, 1969; Богатов, 1994].

Продольные изменения геоморфологических и гидравлических характеристик речных систем оказывают существенное влияние на распределение речных организмов. Большая часть биологических данных, собранных до настоящего времени, соответствует предсказаниям КРК, особенно для ситуаций, когда исследовались интегральные структурные и функциональные характеристики бентосных сообществ. Предпринятые модификации КРК, например эффекты притоков [Benda et al., 2004], круговорота питательных веществ [Minshall et al., 1983], прибрежное влияние [Cummins et al., 1989], последовательная неоднородность [Townsend, 1989], функциональное значение водосборного бассейна [Богатов и др., 2013], оказались совместимы с КРК и усилили ее значимость. Было признано, что КРК представляет собой наиболее адекватную гипотезу о биологических последствиях при изменениях расходов воды, ширины потока, его глубины, температуры и пр. [Cummins et al., 2006]. В КРК, например, утверждается, что относительная ширина русла является надежным интегральным показателем организации речных экосистем. В частности, реки I порядка, независимо от того, с каким порядком водотока они сливаются, всегда будут участками максимальной связи между прибрежной растительностью и речными беспозвоночными – измельчителями макрочастиц органического вещества, так же как и средами, где рост перифитона лимитирован недостатком света, что ограничивает развитие сообществ «соскребателей» [Cummins et al., 2006]. На реках более высокого порядка речные экосистемы становятся менее зависимыми от аллохтонной органики. Одновременно на отдельных участках речного русла усиливается значение внутренних связей между гидробионтами

(в первую очередь между перифитоном и беспозвоночными). Причем если на верхних горных и полугорных участках рек основную роль играют бентосные организмы, то на средних и нижних – бентосные и планктонные.

Биологические сообщества изменяются по водосборным бассейнам от истоков до речного устья в достаточно предсказуемых КРК направлениях [Wetzel, 2001]. В продольном профиле реки закономерно изменяется качество среды обитания гидробионтов за счет как абиотических факторов, так и жизнедеятельности речных организмов. В результате происходит изменение видового состава биоты, которое может иметь плавный или скачкообразный характер. Например, в реках центра Европейской России изменение расхода воды в 10 раз, а ширины русла в 2–3 раза соответствует 50 %-ной смене фауны макробентоса [Чертопруд, 2011]. При впадении крупных притоков, прохождении рекой озера или запруды или при смене окружающего ландшафта возможны скачкообразные изменения характера водотока и резкая смена сообществ [Чертопруд, 2011], в том числе бактериальных [Колмакова, 2014; Kolmakova et al., 2014]. Таким образом, на разноудаленных от истока участках русла могут функционировать разные по составу видов сообщества, которые следует относить к разным экосистемам.

В пределах средних и крупных речных бассейнов, особенно в ситуациях, когда река протекает через разные физико-географические и климатические зоны, системная организация речной биоты определяется не только ее континуумом, но и физико-географическими условиями водосбора, структурно-функциональными характеристиками прибрежных наземных сообществ. В таких случаях исследователи сталкиваются с проблемой пространственного выделения конкретных сообществ и экосистем, границы между которыми могут быть сильно «размыты». В данной ситуации лучше говорить об особой над-экосистемной форме организации природных комплексов – континууме речных экосистем, или «реобиоме»* (от греч. *rheos* – течение, *bios* – жизнь и лат. *-oma* – окончание, обозначающее совокупность). Следовательно, реобиом будет представлять собой совокупность речных экосистем в речном континууме [Богатов, 1994].

* В последние годы в англоязычной литературе биоту речной системы (реобиом) пытаются представить в виде некоего «метасообщества» (metacommunities) [Baxter, 2008], под которым понимают сеть локальных сообществ, связанных широко рассеянными потенциально взаимодействующими видами [Rader, 2008]. Термин «метасообщество» был привнесен в экологию сообществ из идей «метапопуляции», обеспечивших теоретическое понимание проблемы сохранения популяций [Begon et al., 1996; Chase et al., 2005]. Протасов подобный уровень организации природных комплексов называет реобиогеемом (rheobiogeom) [Protasov, 2016]. Геом по Протасову – комплекс сходных по своей структуре и функциональным показателям экосистем. Автор выделяет 12 биогеемов гидросферы и суши, объединенных в 3 типа экосистем: биотический, олигобиотический и суббиотический. Реобиогеем по его схеме относится к олигобиотическому типу.

Механизмы формирования реобиомов заложены не только в изменениях физических параметров речного потока, но и в особенностях исторически сложившихся взаимосвязей между совместно обитающими организмами разных трофических уровней. Кроме того, следует учитывать, что многовидовые сообщества на каждом относительно протяженном участке речного русла (от нескольких десятков до сотен метров) существуют достаточно автономно. Например, высокая доля фильтраторов среди бентосных организмов метаритрали связана не столько с функционированием измельчителей листового опада, обитающих в зонах кренали и эпиритрали, сколько с результатом функционирования самого сообщества метаритрали на вышележащем участке русла, равном, по-видимому, средней дистанции перемещения органических частиц сестона или оторвавшихся от субстрата клеток водорослей (вероятно, эта величина близка к дистанции смещения одного цикла оборота питательных веществ). Результаты специальных исследований показывают, что в период летней межени *при установившемся движении воды** дистанция такого перемещения измеряется в пределах нескольких сотен и даже десятков метров [Cushing et al., 1993; Богатов, 1994; Georgian et al., 2003; и др.], тогда как расстояние до кренали и эпиритрали может измеряться десятками километров. Следовательно, в формировании речного континуума хоть и участвует все сообщество водотока, стабильное взаимодействие между экосистемами отдельных эколого-гидрологических зон (имеются в виду зоны кренали, ритрали и потамали) происходит не напрямую, а опосредованно – через систему взаимодействия следующих друг за другом локальных сообществ, приуроченных к конкретным, часто чередующимся биотопам (например, при чередовании плесов и перекатов).

Таким образом, в речных экосистемах обнаруживается структура связей, приводящая к существованию подсистем, сильно связанных внутри себя, но незначительно взаимодействующих между собой. Такие структуры имеют высокую способность к выживанию, т.е. ликвидация одной подсистемы не обязательно разрушает всю систему [Simon, 1962]. Наличие минимальных связей между подсистемами позволяет отдельным подсистемам продолжать поддерживать свою целостность при крупных нарушениях в соседних подсистемах (например, при отшнурованном русле в условиях засухи) и, следовательно, переживать период, достаточный для самовосстановления утраченных частей системы.

В функционировании отдельных речных подсистем большое значение имеют прямые контакты между гидробионтами, осуществляемые за счет обильного

* Установившимся называют такое движение жидкости, при котором скорость потока и давление в любой его точке не изменяются с течением времени и зависят только от ее положения в потоке. В противоположность этому, неустановившимся движением жидкости называют такое движение, при котором направление, скорость, уклон потока и его расход непрерывно изменяются во времени.

дрифта организмов. Очевидно, что дрейф, например, зообентосных организмов, фиксируемый на определенном створе реки, происходит с верхнего участка русла, протяженность которого соответствует средней дистанции дрейфа гидробионтов. На место снесенных организмов поступают беспозвоночные с верхнего участка реки, а их место, в свою очередь, занимают организмы, обитавшие по течению еще выше, и т.д. Благодаря такому перераспределению организмов в определенной точке водотока плотность зообентоса может продолжительное время оставаться стабильной. Из сказанного следует, что биомассу донных организмов, снесенных через какое-либо сечение реки, необходимо рассматривать как результат распределения их продукции на всей площади русла, расположенной выше створа, где производится отбор проб. Следовательно, автономия отдельных речных подсистем не может быть продолжительной, что, например, подтверждается наблюдениями за гидробионтами на участках русла, отшнурованных в период засухи. При длительной изоляции (более 1,5–2 мес.) здесь могут происходить заметные изменения структурно-функциональных характеристик сообществ беспозвоночных в сторону уменьшения видового разнообразия и увеличения степени доминирования отдельных видов [Богатов, 1994]. Важно, что разрушение связей в реке в результате гидростроительства также может сопровождаться крупными изменениями лотического сообщества на участках водотока как выше, так и ниже плотины [Hauer, Stanford, 1982; Ward, Stanford, 1983; Сорокин, 1987; Rader et al., 2008; Kennedy et al., 2016; и др.]. Особенно заметно подобная фрагментация местообитаний влияет на сокращение рыбных запасов [Orr et al., 2012; Kareiva, 2012; Ziv et al., 2012; Pittock et al., 2017; и мн. др.]. Например, на р. Меконг, занимающей одно из первых мест в мире по промыслу пресноводных рыб, запланированное строительство плотин только на ее притоках может привести к сокращению рыбных запасов на 10–26 % к 2030 г., тогда как строительство на главном русле – еще на 60–70 % [Orr et al., 2012].

Важно отметить, что высказанные взгляды о континууме речной экосистемы, как целостного природного комплекса, перекликаются с концепцией георастительных систем, сформулированной Титовым, под которыми он понимал совокупность растительных сообществ и условий их развития в геологическом водосборном бассейне. В частности, он указывал, что «...жизнедеятельность растительного сообщества, обитающего на какой-либо части склона, изменяет распределение воды и геохимическую и переносную деятельность воды, двигающейся по склону. Эти изменения, естественно, проявляются не только на местообитании данного сообщества, но и на местообитаниях, расположенных ниже по склону, куда движется вода, производя свою работу. Жизнедеятельность сообщества, следовательно, оказывает при посредстве воды дальнейшее влияние на условия жизни, на жизнедеятельность, на эволюцию других сообществ, обитающих ниже, а непосредственно и выше по склону бассейна... Вся

совокупность взаимодействующих растительных сообществ и условий среды геологического водосборного бассейна представляет собой систему, развивающуюся как единое целое» [Титов, 1952, с. 21–22]. Следовательно, как отмечает Титов, георастительная система представляет собой исторически образовавшуюся в пределах геологического водосборного бассейна «...совокупность взаимодействующих условий среды и растительных сообществ и всех накопленных в прошлом результатов их взаимодействия» [с. 23].

Исходя из концепции о георастительных системах речные системы являются их неотъемлемой частью. Причем в дренажных частях бассейнов малых рек речные сообщества напрямую зависят от аллохтонного органического вещества и других питательных веществ, поступающих с водосбора, степени развития древесного полога и пр. В то же время многие речные беспозвоночные (главным образом амфибиотические насекомые) и рыбы (особенно идущие на нерест лососевые рыбы) способны возвращать в круговорот наземного сообщества питательные элементы, сокращая их вынос из системы. Как было показано в разделе 2.4, в верховьях рек (обычно горного и полугорного типа) происходит более быстрый круговорот питательных веществ, по сравнению с реками более высокого порядка. По мере продвижения от истоков к устью речное сообщество становится менее зависимым от наземной системы, усиливается значение автохтонного органического вещества и внутренних связей между гидробионтами.

В пределах нижнего течения рек на периодически затапливаемых в периоды паводков участках суши могут формироваться особые наземные растительные сообщества, способные функционировать только в условиях промывного, аллювиального режима. На Дальнем Востоке России к таким сообществам относятся, например, чозениевые леса (рис. 2.83, 1, 2) [Колесников, 1937], в поймах тропических рек – своеобразные растительные сообщества, представляющие собой болотный или почти круглый год затапливаемый лес (рис. 2.83, 3) [Гайслер, 1988], в дельтах рек распространены мангровые заросли древесных пород (рис. 2.83, 4) и т.п. В свою очередь, затапливаемые участки поймы играют большую роль в развитии речного сообщества. В частности, на Амуре они являются местом нереста многих амурских рыб и нагула их личинок и, таким образом, должны рассматриваться в качестве составной части речной экосистемы.

Очевидно, что с позиций целостности экосистем каждого речного бассейна все крупные реки мира вместе с притоками и пойменными озерами достаточно сложно рассматривать в качестве гигантских мегаэкосистем. Однако их целостность и структурно-функциональная упорядоченность по отношению к их биоте наглядно может проявляться при функционировании высших уровней трофической цепи, представители которых обладают способностью к активным крупномасштабным миграциям. Тем не менее широко мигрирующие виды рыб, очевидно, не могут определять основные устойчивые потоки вещества,

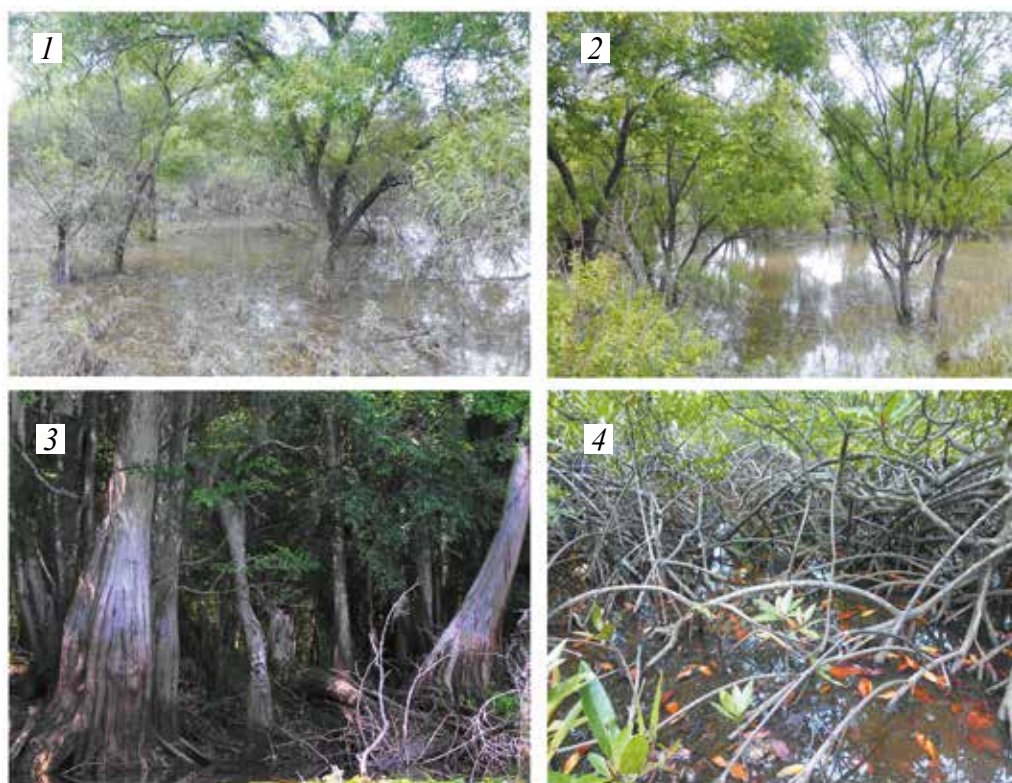


Рис. 2.83. Чозениевый лес в пойме р. Раздольная (1, 2) (Приморский край, Россия); затопляемый лес в бассейне р. Эдисто (3) (Южная Каролина, США), мангровые заросли кустарника в дельте р. Меконг (4) (Вьетнам). Фото В. Богатова

энергии и информации в пределах всего пространства, в котором они мигрируют, хотя на отдельных участках этого пространства их роль в биотическом круговороте может быть высокой. Например, важную роль в функционировании речных экосистем играют идущие на нерест крупные стада проходных лососей и скатывающаяся в море их молодь. В связи с чем целостность лососевых рек как систем, обеспечивающих воспроизводство этих видов рыб, обычно более выражена, что необходимо учитывать при их хозяйственном освоении. Однако к природной системе, в которой обитают популяции проходных лососей, следует отнести не только нерестовые реки, но и отдаленные участки моря, где происходит нагул взрослых особей. При этом, очевидно, нет оснований считать нерестовые реки и участки моря, где нагуливаются лососи, единой экосистемой, хотя по отношению к проходным лососевым рыбам такая система несомненно является целостной.

Для выделения подобных природных комплексов Богатовым [1994] был введен термин «полибиом» (от греч. *polys* – разнообразный, *bios* – жизнь и лат.

-ота – окончание, обозначающее совокупность), представляющий собой совокупность примыкающих друг к другу или пространственно разделенных экосистем, обеспечивающих существование популяций широко мигрирующих видов животных. Очевидно, что подобные полибиомы могут включать в себя экосистемы или объединенные в биомы совокупности экосистем, расположенные в разных ландшафтно-географических зонах. Полибиомы совпадают с ареалом популяций широкомигрирующих видов и в данном пространстве образуют особый целостный природный комплекс, нарушение связей между частями которого (миграционных коридоров) может приводить к исчезновению широкомигрирующих организмов. Понятно, что если целостность биоты гигантских речных систем будет проявляться за счет организмов-мигрантов, тогда такие системы одновременно будут представлять собой полибиомы, а в случаях с проходными лососями, угревыми или другими широкомигрирующими организмами, местообитание которых связано не только с речной системой, но и морской средой, будут являться составной частью более крупных полибиомов.

Следует отметить, что при уменьшении пространственных масштабов (порядка) речных систем все большую роль в обеспечении их целостности будут приобретать другие группы речных гидробионтов – водоросли, беспозвоночные и др. Важно, что именно на низших уровнях трофических цепей осуществляются основные потоки вещества, энергии и информации. Следовательно, с полибиомного на экосистемный уровень организации живого мы выходим при условии, когда целостность биологической системы начинает определяться продуцентами и первичными консументами. Устойчивая пространственная взаимосвязь между такими организмами в реках может осуществляться не только через воздействие вышележащего участка на нижележащий, но и через активный или пассивный дрейф гидробионтов вниз по течению, полет к верхним или нижним участкам рек имаго водных насекомых, миграции некоторых видов беспозвоночных животных против течения, перенос потоком воды аллохтонного и автохтонного органического вещества на дальние расстояния во время высокой воды, другие формы связи.

Отметим, что при уменьшении порядка водотока одновременно будет уменьшаться и роль представителей высших звеньев трофической цепи (например, хищных рыб) в поддержании целостности сообщества. Более того, по отношению к кренали и верхним участкам ритрали (водотоки I и II порядков) такие гидробионты могут рассматриваться в качестве одного из внешних факторов воздействия. Имеются сведения, что рыбы и другие водные позвоночные на верхних участках рек не оказывают значительного влияния на структуру бентосных сообществ [Reice, Edwards, 1986; Townsend et al., 1987]. По-видимому, воздействие на экосистемы верховий рек многих видов рыб в периоды их нагула можно сопоставить с воздействием околотовных животных (выдра, птицы и пр.).

2.6. ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ РЕОБИОМОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПРИРОДНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Под экстремальными природными воздействиями мы понимаем воздействия природных явлений, при которых достигаются предельные (крайние) минимальные или максимальные значения каких-либо структурных или функциональных параметров популяций и/или отдельных сообществ организмов. Соотношение минимально возможных значений определенных параметров к максимально возможным (например, соотношение минимальной биомассы к максимальной за насыщенный случайными природными событиями сезон) могут характеризовать пороговую устойчивость биологических систем*, превышение которой приводит к их необратимой трансформации или разрушению. В ненарушенных человеком природных комплексах качество, сила и продолжительность воздействия экстремальных природных явлений обычно не превышают адаптационных возможностей организмов и сообществ, что обеспечивает их неограниченно долгое существование. При этом необходимо помнить, что структура сообществ организмов и экосистем сохраняется не за счет установления устойчивых связей между элементами (как у объектов неживой природы), а за счет постоянных затрат энергии на поддержание упорядоченности и воспроизводства элементов системы, их структур и структур организмов [Алимов и др., 2013].

В функционировании реобиомов экстремальные природные явления могут играть определяющую роль, особенно те из них, которые за короткие промежутки времени кардинально изменяют условия обитания гидробионтов, вызывая массовые миграции организмов, их травмирование или гибель. К подобным явлениям природы обычно относят крупные половодья после многоснежных зим, наводнения из-за ледовых заторов, высокие дождевые паводки, продолжительные летние и зимние межени, приводящие к осушению низкой поймы и русел летом и промерзанию рек до дна зимой, интенсивные биогенные нагрузки, экстремально высокие температуры воды, и пр. [Богатов, 1994]. Распространенность экстремальных явлений по земному шару зависит от географического положения территории, особенностей ландшафта, погодных условий и ряда других причин. Например, в пустынных районах обычны временные водотоки, которые возникают после интенсивных ливней и быстро

* Под устойчивостью сообщества или экосистемы предлагается понимать отклонение их характеристик от некоего среднего уровня, свойственного конкретной системе организмов как исторически сложившейся при определенных условиях. В качестве меры устойчивости системы можно рассматривать вариабельность динамики биомассы, представляющей собой отношение минимальной за вегетационный сезон (год) или многолетний период биомассы к максимальной. Этот показатель значим уже потому, что с биомассой связаны все функциональные и некоторые структурные характеристики экосистем и сообществ организмов [Алимов и др., 2013].

пересыхают (рис. 2.84, 1, 2). Некоторые реки в пустынях, такие как, например, Колорадо*, берут свое начало за пределами пустыни и благодаря своей полноводности пересекают их, не пересыхая. При этом, например, р. Колорадо образует один из глубочайших в мире каньонов (Гранд-Каньон), который занесен в список Всемирного наследия ЮНЕСКО (рис. 2.84, 3, 4).

Среди рек умеренной зоны особенно сильное влияние на облик речных экстремальные события оказывают в зонах муссонного климата. Реки в этих районах отличаются крайне неустойчивым водным режимом. Для них характерно сравнительно невысокое весеннее половодье, мощные летне-осенние паводки от ливневых дождей, низкая и продолжительная зимняя межень [Стряпчий, 1979; Гарцман и др., 1993, 2015; и др.].

Речные наводнения относятся к числу наиболее распространенных природных явлений, в результате которых происходит резкий подъем уровней воды и затопление обширных территорий. Наводнения способны провоцировать



Рис. 2.84. Сухие русла рек в пустыне штата Аризоны (США) – 1, 2; Гранд-Каньон р. Колорадо (Аризона, США) – 3, 4. Фото В. Богатова

* Колорадо – река на юго-западе США и крайнем северо-западе Мексики. Длина – 2334 км, площадь бассейна – 637 137 км². Река берет свое начало в Скалистых горах штата Колорадо (США) и впадает в Калифорнийский залив (западный берег Северной Америки).

обвалы и оползни. Кроме того, в руслах горных ручьев и рек в периоды продолжительных дождей могут возникать *сели* – бурные грязекаменные потоки, обладающие огромной разрушительной силой (рис. 2.85). В результате крупных паводков биомасса зообентоса в горных реках уменьшается в десятки, а то и сотни раз [Богатов, 1994], а в периоды селей водные сообщества разрушаются. В частности, по наблюдению Богатова, через месяц после прохождения в небольшом ручье (бухта Пичгытгын, западная Камчатка) селя в русле ручья были обнаружены лишь единичные личинки хирономид новой генерации, в то время как при больших паводках, не вызывающих селевых потоков, сообщество зообентоса восстанавливает свою структуру в течение 1–2 мес. после прохождения паводковых вод [Богатов, 1994].

По высоте подъема уровня воды, размерам площади затоплений и величине наносимого ущерба речные наводнения делят на четыре категории: *низкие*, охватывающие малые территории и отличающиеся небольшим подъемом уровня воды; *высокие*, сопровождающиеся значительными затоплениями сравнительно больших участков речных долин; *выдающиеся*, охватывающие целые речные бассейны, и *катастрофические*, вызывающие затопление громадных территорий в пределах одной или нескольких крупных речных систем (рис. 2.86, 1) [Нежиховский, 1988].

В периоды наводнений происходит транспорт больших масс речных наносов*, которые подразделяются на *взвешенные* и *влекомые*. Взвешенными



Рис. 2.85. Грязе-каменная смесь, вынесенная небольшим ручьем после сильного дождя (бухта Пичгытгын, западная Камчатка; июль 2011 г.). Фото В. Богатова

* Речными наносами называются твердые минеральные частицы, переносимые потоком и формирующие русловые и пойменные отложения. Речные наносы образуются из продуктов выветривания, денудации и эрозии горных пород и почв. Водная эрозия (разрушение земной поверхности под действием

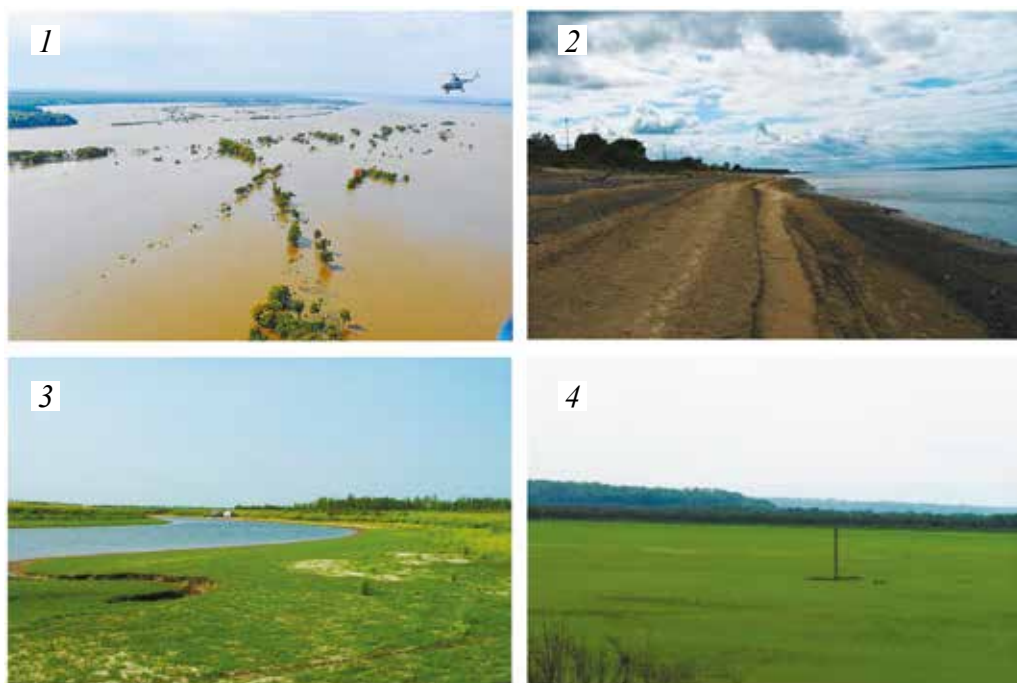


Рис. 2.86. Амур, разлившийся в Нанайском районе (Хабаровский край) в период катастрофического наводнения 2013 г. Фото с сайта: <http://renclassic.ru/Ru/Phenomenon/1705/1744/> (1). Тот же район в низкую воду в 2007 г.: р. Амур у пос. Славянка (2); р. Пир, правый приток Амура (3); пойменное оз. Синдинское (4). Фото В. Богатова

называются наносы, переносимые в толще воды во взвешенном состоянии. Содержание взвешенных наносов в потоке оценивается *мутностью воды* (*масса взвешенных наносов в единице объема смеси воды с наносами*). Влекомые наносы перемещаются по дну, причем их движение происходит в виде скольжения, перекатывания или перескакивания (сальтации) [Алексеевский, 1998]. Размеры минеральных частиц и масштабы транспорта влекомых наносов зависят от силы паводка.

Взвешенные и влекомые наносы оказывают прямое негативное воздействие на речных гидробионтов. Например, в лососевых реках взвешенные минеральные частицы, имеющие острые грани, повреждают икру, эмбрионы, эпителий жабр и кожу молоди лососей с последующими возможными кожными заболеваниями и нарушением функции дыхания и водно-солевого

текучих вод) представляет собой наиболее активный процесс, обогащающий реки наносами. Водная эрозия подразделяется на склоновую и русловую. Склоновая эрозия представляет собой размыв и смыл почв и горных пород талыми и дождевыми водами, стекающими по склону. Русловая эрозия связана с размывом коренных пород дна, берегов русла и склонов долин. Режим речных наносов зависит от типа водного режима реки и геологических особенностей ее бассейна.

регулирования [Чалов, 2011]. Большие массы влекомых наносов разрушают бентосные сообщества, вызывая катастрофический дрейф и массовую гибель организмов. Особенно велико воздействие влекомых наносов на биоту горных рек, где такие наносы составляют основную часть *твёрдого стока* (*перемещение наносов в процессе поверхностного стока*).

В меженные периоды может происходить пересыхание значительной части как русел рек (рис. 2.86, 2, 3), так и пойменных водоемов (рис. 2.86, 4), что влечет за собой гибель многих гидробионтов, оказавшихся на суше. Причем даже крупные двустворчатые моллюски, попавшие на сушу на непродолжительное время и, казалось бы, способные за счет закапывания в грунт и смыкания створок пережить неблагоприятные условия, в этот период поедаются птицами или в их полость откладывают яйца некоторые виды мух, в результате чего мягкие ткани моллюсков впоследствии поедаются их личинками.

Во многих работах, посвященных особенностям функционирования речных экосистем, экстремальные природные явления рассматриваются либо как факторы, наносящие некий урон речной биоте [Grizzel, 1976; Бродский, 1976; Short, Ward, 1980; Леванидова, 1982; и др.], ограничивающий ее разнообразие [Andrews, Minshall, 1979; Sagar, 1986; и др.], либо не учитываются вовсе, как, например, при обосновании концепции речного континуума [Vannote et al., 1980]. Существует и другая точка зрения, по которой считается, что физические нарушения, вызванные экстремальными природными явлениями, не являются стрессом для сообществ [Minshall et al., 1985; Minshall, 1988; Богатов, 1994; и др.] и имеют фундаментальное значение в организации речных экосистем наряду с чисто биологическими формами организации, такими как конкуренция или хищничество [Townsend, 1989].

2.6.1. Факторы устойчивости и выносливости реобиомов

В каждом географическом районе отдельные речные организмы, сообщества и экосистемы исторически адаптированы к особенностям *водного режима реки* (*совокупное изменение во времени расходов и уровней воды, уклонов и скоростей течения, термического и ледового режимов, химического состава природных вод и других характеристик*). Особенно важны в этом плане морфо-анатомические, поведенческие и онтогенетические (ускорение или замедление индивидуального развития) адаптации гидробионтов. В частности, многие подвижные бентосные беспозвоночные, обитающие на твердом грунте, имеют уплощенную обтекаемую форму тела и низкую плавучесть. Нижняя поверхность их тела, как правило, очень плоская (рис. 2.87), что увеличивает трение с грунтом и ослабляет возможность механического сноса гидробионтов водным потоком. Другие организмы прикрепляются к грунту. Например, типичные для проточных вод личинки мошек (*Simulida*), в массе покрываю-

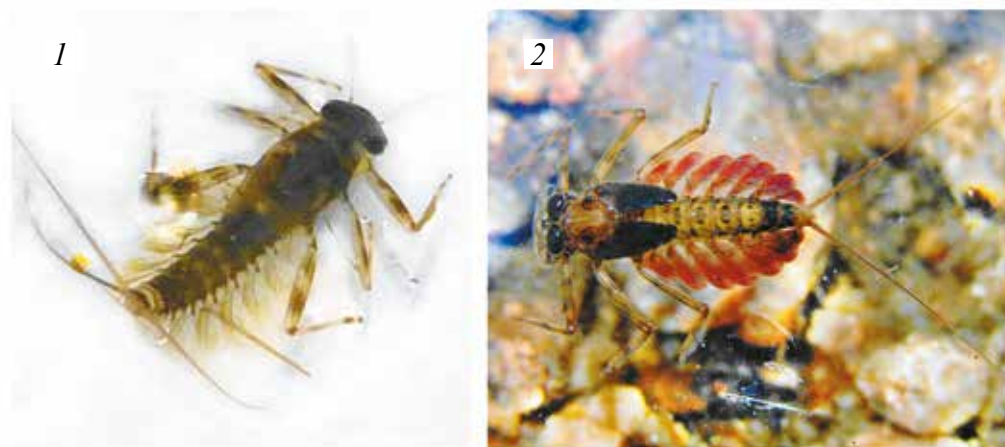


Рис. 2.87. Личинки поденок (Ephemeroptera) с плоским телом: 1 – *Cinygmula sapporensis* (фото В. Богатова); 2 – *Epeorus pellucidus* (фото Т. Туновой)

щие подводные предметы, прикрепляются к ним венчиком крючков, который находится на заднем конце тела (см. рис. 2.12, 13), а личинки блефароцерид (Blepharoceridae) – присосками (см. рис. 2.12, 15). Многие беспозвоночные строят подвижные или неподвижные домики, например личинки хирономид и ручейников.

При резком изменении уровня воды немаловажную роль в поддержании структуры бентосных сообществ играет изменение количественных показателей активного дрейфа беспозвоночных. В частности, в условиях развивающегося паводка при увеличении мощности потока наблюдается увеличение дистанции дрейфа мигрантов (рис. 2.88, 1), при этом резко уменьшается доля особей, принимающих участие в дрейфе (рис. 2.88, 2). В результате в начальный период паводка количественные показатели интенсивности дрейфа могут оставаться неизменными или даже несколько уменьшаться. В то же время при стабилизации показателей относительной миграционной активности гидробионтов (M_b' – доля биомассы организмов, которые в течение суток поднимаются с 1 м² площади грунта в толщу воды объемом 1 м² × h , по отношению к биомассе этих же организмов на грунте, %) и дальнейшем увеличении дистанции дрейфа происходит скачкообразное возрастание интенсивности дрейфа до значений, превышающих продукцию гидробионтов (рис. 2.89). В такой ситуации отмечается отрицательный дрейф и снижение биомассы организмов на грунте.

Образ жизни отдельных гидробионтов в условиях экстремальных природных воздействий может повышать шансы на выживание всего сообщества. Например, исключительное значение для функционирования биоты в зоне ритрали имеют сообщества сетеплетущих ручейников. Эта широко распространенная группа водных насекомых в большинстве своем концентрируется

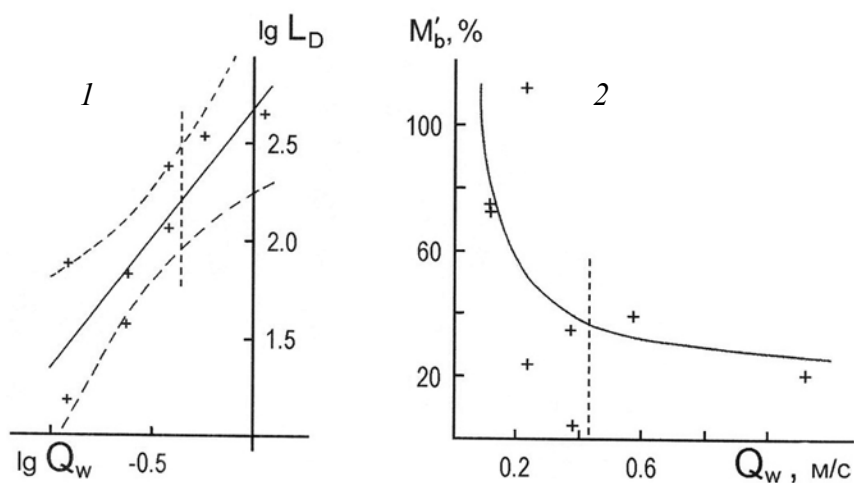


Рис. 2.88. Зависимость логарифма дистанции дрейфа ($\lg L_D$) от логарифма расхода воды ($\lg Q_w$) – (1) и относительной миграционной активности ($M'_b, \%$) от расхода воды ($Q_w, \text{м/с}$) – (2) у *Gammarus lacustris* в период развивающегося паводка в р. Ухта (бассейн Нижнего Амура). Пунктирной линией показан момент паводка, после которого суточный дрейф гаммарид превышает величину их суточной продукции. Из: [Богатов, 1994]

в местах с высокой скоростью течения [Hawkins et al., 1982]. Многие их представители способны занимать биотопы с широким интервалом скоростей течения, глубин и температур воды [Кочарина, 2001]. По-видимому, при высоких скоростях течения личинки сетеплетущих ручейников получают необходимое количество кислорода для поддержания своей жизнедеятельности [Philipson, 1954], а их ловчие сети наиболее эффективно улавливают для питания взвешенные органические вещества и мигрирующих гидробионтов [Cummins, Klug, 1979; Benke, Wallace, 1980; и мн. др.]. Являясь доминирующей группой в экосистемах горных и полугорных рек, личинки сетеплетущих ручейников строят ловчие сети, размещая их между камнями разного размера. В результате гравий, галька и валуны склеиваются между собой, что повышает устойчивость грунта

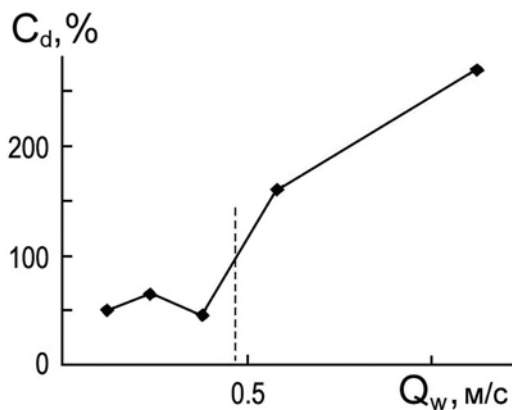


Рис. 2.89. Зависимость доли суточной продукции ($C_d, \%$) *Gammarus lacustris*, удаляемой за счет дрейфа из сообщества р. Ухта, от расхода воды ($Q_w, \text{м/с}$) в период развивающегося паводка. Пунктирной линией показан момент паводка, после которого суточный дрейф гаммарид превышает величину их суточной продукции. По материалам Богатова [1994]

к воздействию бурного потока. Это позволяет бентосному сообществу успешно переживать паводки не только небольшой, но и средней силы.

Особое значение для поддержания разнообразия речных сообществ имеют адаптации гидробионтов к температурным условиям. Например, в соответствии с правилом *термального равновесия* (*thermal equilibria*) Ваннота и Свиней [Vannote, Sweeney, 1980] для каждого вида личинок насекомых для своего оптимального развития* характерен свой температурный оптимум (*очевидно, это правило справедливо и для других групп беспозвоночных*). Изменения температурных условий в течение года позволяют распределяться на одних и тех же биотопах родственным видам, активные периоды развития которых следуют во времени друг за другом. В специальном исследовании Радера с соавторами [Rader et al., 2008] на водотоках разной степени зарегулирования было показано, что поддержание диапазона изменения температуры воды, к которому исторически адаптированы сообщества, более важно для сохранения и восстановления их разнообразия, чем изменение гидрологических характеристик.

Не менее важны адаптации речных организмов к пересыханию или промерзанию речного русла. Например, в периоды паводков личинки насекомых и ракообразные способны пропускать очередные линьки, а в условиях межени – ускорять онтогенез. Некоторые беспозвоночные (например, амфиподы и др.) хорошо переносят вмерзание в лед. Амфиподы, планарии и личинки насекомых способны заблаговременно покидать осушаемые участки русла [Богатов, 1994]. Причем в период межени, связанной с пересыханием русла, одна часть гидробионтов перемещается в подрусловой поток, другая – впадает в покоящиеся стадии развития, третья – скапливается на непересыхающих участках русла.

Ранее (2–6 августа 1975 г.) нами в нижнем течении полугорной р. Бомнак (правый приток р. Зея, площадь бассейна – около 490 км²) были проведены эксперименты по заселению бентосными организмами меченых валунов в условиях кратковременного снижения уровня воды на плесе, перекате и небольшом заливе. Скорость течения на перекате составляла 1,2–1,3 м с⁻¹, на плесе – 0,5–0,8 м с⁻¹, а в заливе течение практически отсутствовало. На каждый из этих участков на глубину 0,4–0,5 м были помещены по 28 меченных стеклографом камней, затем из воды в сачке ежедневно вынимали по 7 камней. Поселившихся на них за период экспозиции животных отмывали в ведре, подсчитывали и взвешивали. Как видно из рис. 2.90, в первые 2 сут опыта при неизменном уровне воды плотность и биомасса зообентосных организмов

* Под оптимальным развитием здесь понимается развитие при таких температурных условиях, при которых у насекомых достигается максимальный размер и максимальная плодовитость имаго. Изменения температурных режимов в ту или иную сторону от оптимальных значений приводят к формированию более мелких и менее плодовитых имаго [Vannote, Sweeney, 1980].

на всех трех участках стабильно увеличивалась. На плесе камни заселялись в основном личинками поденок, хирономид (*Crycotopus* gr. *biformis*, *Cr.* gr. *algarum*) и ручейников *Glossosoma altaicum*; в заливе – личинками поденок, веснянок (*Capnia* sp.), хирономид (*C.* gr. *biformis*) и ручейников (*Hypdatophylax nigrovittatus*), на перекате – личинками мошек (*Gnus subvariegatum*, *Simulium vulgare*) и ручейников (*Gl. altaicum*).

В период с 4 на 5 августа (3-и сутки опыта) в реке произошло понижение уровня воды на 0,25 м (рис. 2.90, 1), что сопровождалось резким снижением плотности и биомассы организмов на меченых камнях, помещенных на плесе и в заливе, хотя эти камни располагались еще на достаточной для жизнедеятельности глубине (0,15–0,25 м). На перекате в условиях быстрого течения заселение беспозвоночными камней в период спада уровня продолжалось, однако более низкими темпами (рис. 2.90, 2, 3). На 4-е сутки произошла стабилизация уровня воды и скорость заселения камней на всех участках вновь стала нарастать. Таким образом, наиболее активно донное сообщество реагировало на спад уровня воды на участках, где скорость течения не превышала 0,8 м/с.

В работе Боруцкого с соавторами [1952] при изучении обсыхающего глинистого участка дна Амура было отмечено, что вместе с отступающей водой мигрирует вся эпифауна. Однако Константинов [1950] указывал, что личинки хирономид здесь не мигрировали вслед за отступающей водой в количествах, которые могли бы быть учтены. Для некоторых видов амфибиотических насекомых, например, поденок рода *Baetis*, было показано, что снижение расхода воды и, вследствие этого, сокращение жизненного пространства могут

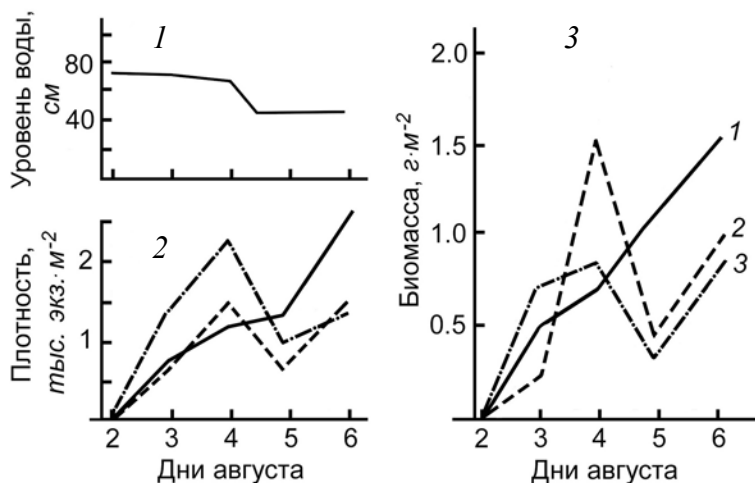


Рис. 2.90. Динамика заселения бентосными животными меченых камней в нижнем течении р. Бомнак (бассейн р. Зея) в августе 1975 г.: 1 – уровень воды от условного 0; 2 – плотность беспозвоночных, тыс. экз. м⁻²; 3 – биомасса, г м⁻² (1 – перекат, 2 – плес, 3 – залив).

Из: [Богатов, 1978]

способствовать преждевременному вылету имаго с уменьшенной индивидуальной массой особей [Illies, 1979]. Тем не менее на пересыхающих участках грунта в периоды засухи наблюдается массовая гибель организмов [Ladle, Bass, 1981; Delucchi, 1988; Богатов, 1994]. Особенно много гидробионтов гибнет в зонах эпилитрали и кренали, когда пересыхают обширные участки русла. Например, в зоне кренали р. Вторая Речка (лесопарковая зона Владивостока) в летне-осеннюю засуху 1991 г., продолжавшуюся с августа до конца октября, в сентябре практически полностью пересохло русло. Вода здесь сохранилась лишь в небольших ямах и местах выхода на поверхность подруслового потока. На этих участках происходила концентрация амфипод и планарий, доминировавших в этот период в реке, а также лягушек *Rana semiplicata* Nik. Большое число гидробионтов (амфипод, планарий, личинок ручейников и хирономид) было сконцентрировано в небольшом, длиной около 30 м, ключе, правом притоке реки.

Все непересохшие участки, на которых скопились гидробионты, условно можно было разделить на проточные, где течение прослеживалось по всей их площади, полупроточные, где заметное течение имелось лишь непосредственно в месте выхода подруслового потока, и непроточные.

К концу сентября в непроточных участках наблюдался дефицит кислорода и активное развитие анаэробных процессов разложения листового опада. Отмечена массовая гибель гидробионтов. К середине октября все беспозвоночные животные здесь погибли.

В полупроточных ямах гидробионты концентрировались только на проточных местах, часто образуя на небольших площадях крайне плотные скопления. Например, плотность крупных амфипод в пересчете на 1 м² здесь могла достигать 300 тыс. экз. с биомассой 1,7 кг, а планарий – 100 тыс. экз. с биомассой 0,08–0,2 кг. На непроточных участках таких ям также наблюдалось развитие анаэробных процессов разложения листового опада и массовая гибель амфипод.

Наиболее благоприятные условия для переживания гидробионтами засухи сложились на всех проточных участках. Здесь анаэробные процессы не получили развития, а массовая гибель организмов отсутствовала. Плотность беспозвоночных макробентоса в середине октября достигала 33 тыс. экз. на 1 м² с биомассой 0,2 кг. Высока была и плотность листового опада (700 г сухой массы на 1 м²), большую часть из которого составляли листья граба и ивы. Многие гидробионты распределялись сравнительно равномерно (например, амфиподы), однако у планарий был выражен положительный реотаксис, поскольку эти беспозвоночные концентрировались только в верхней, истоковой их части.

В среднем, к концу засухи 1991 г. на 0,5-километровом отрезке р. Вторая Речка (зона II порядка) насчитывалось 12 непересохших участков, из которых

4 оказались непроточными, 3 – полупроточными и 5 – проточными. Общая площадь их составила около 36 м² (около 70 % приходилось на проточные). Следовательно, при средней ширине потока в 1,5 м в период осенней засухи пересохло около 95 % площади русла и только около 3 % выполняло функцию убежищ. В конце октября прошли дожди, и река полностью восстановилась, при этом амфиподы равномерно расселились на отрезке наиболее протяженного бывшего сухого участка русла уже через 1 сут после начала дождей, планарии – на 3-и сутки, а личинки ручейников *N. ussuriensis* – примерно через неделю. Интересно, что на бывших сухих участках русла после его заполнения водой в массе стали развиваться олигохеты, численность и биомасса которых через 1 мес. после восстановления потока достигала 830 экз. м⁻², с биомассой около 1 г, что от состава всего бентоса составило 15 и 11 % соответственно. Вероятно, массовому развитию олигохет здесь способствовало большое количество органики, накопившейся в грунте за периоды засухи.

Таким образом, на периодически пересыхающих (промерзающих) верхних участках русла дальневосточных горных и полугорных рек (в основном это зоны кренали и эфиритрали) могут функционировать сообщества, таксономическая структура которых поддерживается в основном за счет небольших непересыхающих (непромерзающих) проточных участков, суммарная площадь которых может составлять не более 3 % от общей площади водотока в меженный период [Богатов, 1994]. Подобные участки-рефугиумы являются ключевыми элементами верховьев речных экосистем, благодаря которым поддерживается определенный уровень биологического разнообразия гидробионтов.

При количественной оценке *устойчивости* сообществ беспозвоночных в верховьях рек, например по соотношению минимальной за вегетационный сезон биомассы к максимальной [Алимов, 2000], необходимо иметь в виду, что на таких участках значительный прирост или убыль биомассы часто определяются не продукцией или элиминацией гидробионтов, а их массовыми миграциями, в том числе перемещением во временные рефугиумы, а также вылетом имаго амфибиотических насекомых. Следовательно, по отношению к данным участкам русла разница между минимальной и максимальной биомассами, например, амфипод может превышать 4 порядка, что указывает на неустойчивость их сообщества. Однако если иметь в виду динамику всего сообщества беспозвоночных, обитающих в определенной эколого-гидрологической зоне водотока, то приведенную выше оценку его устойчивости нельзя признать объективной. Дело в том, что, например, в засушливый период абсолютная численность или биомасса организмов в водотоках не увеличиваются, а снижаются за счет массовой гибели особей в основном на пересохшем участке дна. Если всю биомассу гидробионтов в засушливые и паводковые периоды оценивать в абсолютных величинах или по отношению к площади русла с учетом, например, среднемеженного

уровня воды, то разница между минимальной и максимальной биомассой рачков за вегетационный сезон будет составлять не 4, а менее 2 порядков [Богатов, 2001].

Аналогичные результаты получены и для бентоса ритрали южно-приморской р. Кедровая (впадает в Амурский залив Японского моря), при этом разница между минимальной и максимальной биомассой донных организмов в пересчете на среднюю площадь учтенного участка водотока оценивалась в пределах 1 порядка [Tiunova et al., 1998]. Таким образом, в общих чертах о сообществах речных систем зоны муссонного климата следует говорить как о неустойчивых либо низко устойчивых. При этом по мере продвижения от истоков (зона кренали) к среднему течению (зона ритрали) устойчивость речных сообществ заметно возрастает. На этом отрезке речного русла увеличиваются водность реки и разнообразие рефугиумов, что, по-видимому, способствует снижению сезонного диапазона колебаний не только биомассы, но и других структурно-функциональных характеристик биоты.

В маловодный период в верховьях горных рек южной части Дальнего Востока (реки I–III порядков) отмечена способность речных сообществ длительное время автономно функционировать на отшнурованных участках русла, сохраняя свою организованность на отдельных биотопах при крупных нарушениях в примыкающих к ним частях [Богатов, 1994]. Такие подсистемы имеют высокую возможность для выживания, что позволяет говорить о речных экосистемах как о чрезвычайно выносливых, в трактовке Алимова [2000], определяющего *выносливость* как способность экосистем противостоять изменениям внешних условий. Видимо, в зоне муссонного климата высокая выносливость речных экосистем за исключением рек с неустойчивым руслом на фоне их низкой устойчивости, обусловленной экстремальными воздействиями среды (крупные паводки и засуха), позволяет речным сообществам сохранять свое разнообразие не только в условиях засухи, но и при воздействии паводков малой и средней силы. В то же время катастрофические паводки, несомненно, могут серьезно нарушать континуальную структуру реобиома. При снятии экстремальной нагрузки и стабилизации гидрологических условий в речных системах быстро идут процессы восстановления нарушенной структуры сообществ и формирование континуума [Богатов, 1978, 1994].

Важную роль в формировании речного стока в горной-лесной местности играет почвенный покров и состав древесной растительности. Лесные сообщества представляют собой долговечный и наиболее мощный естественный регулятор руслового стока [Розенберг и др., 1993]. Особо эффективны в этом плане широколиственно-кедровые леса [Жильцов, 2008], ранее широко распространенные на юге Дальневосточного региона. Целенаправленное использование в водохозяйственной практике гидрологических свойств лесных экосистем

позволяет решать комплекс задач, включающих регулирование объема стока, выравнивание его *гидрографа* (*график изменения во времени расходов воды*), улучшение качественного состава водных ресурсов. В то же время в Российской Федерации подавляющая площадь лесного фонда отнесена к лесам *третьей группы**, поэтому *главное пользование*** в них проводится без учета водоохранно-защитных свойств лесов. Применяемый до сих пор расчет лесопользования неминуемо ведет к истощению лесных ресурсов [Розенберг и др., 1993; Богатов и др., 2000].

Особое значение лесная растительность имеет в верхнем поясе гор, где даже незначительные нарушения лесного покрова приводят к увеличению вероятности разрушительных паводков и интенсивной эрозии почв. В частности, по данным Кожевниковой и Дюкарева [2011], превышение всего 20 % уровня нарушенности*** южно-приморских лесов приводит к длительному восстановлению их гидролого-защитных функций, причем для смешанных темнохвойных лесов это составляет 30–40 лет. При превышении 50 % уровня нарушенности лесов наблюдается очень высокая интенсивность эрозионных процессов на водосборе, а для восстановления гидрологических функций леса требуется около 100 лет.

Вырубка лесов, осушение водно-болотных угодий, уплотнение почвенного покрова приводят к ускорению поверхностного стока с водосбора в речное русло. Огромный урон лесной растительности и соответственно речным системам наносят обширные лесные пожары [Rhoades et al., 2011]. На водосборах, пройденных огнем, усиливается эрозия, происходит смыв почв, возникает овражная эрозия, что приводит к увеличению мутности рек и, в конечном итоге, значительной потере биологического разнообразия водных организмов. Так как речные экосистемы Северной Пацифики сформировались в условиях низкой естественной мутности (< 10 мг/л) [Chapman, 1988; и др.], постоянное содержание в воде даже небольших количеств мелких минеральных фракций отрицательно сказывается на жизнедеятельности всего сообщества организмов [Чалов, 2011].

* В Российской Федерации лесной фонд делится на три группы, а леса первой группы – на категории защитности. **К лесам первой группы** относятся леса, основным назначением которых является выполнение водоохраных, защитных, санитарно-гигиенических, оздоровительных, иных функций, а также леса особо охраняемых территорий. **К лесам второй группы** относятся леса, имеющие ограниченное эксплуатационное значение, а также леса в регионах с недостаточными лесными ресурсами, для сохранения которых требуется ограничение режима лесопользования. **К лесам третьей группы** относятся леса многолесных регионов, имеющие преимущественно эксплуатационное значение. Леса этой группы разделяются на освоенные и резервные.

** **Главное пользование лесом** может означать любой вид пользования, например рекреации, но, как правило, означает использование древесного запаса.

*** **Уровень нарушенности лесов** обозначает долю лесной площади водосбора, на которой произошла трансформация лесных экосистем.

2.6.2. Структура речных экосистем зоны муссонного климата

В Российской Федерации муссонный климат характерен для южной части Дальнего Востока, большая часть территории которой относится к горно-лесной зоне. Неустойчивый водный режим рек здесь определяет общую динамику фито- и зообентосных сообществ, что было показано в ряде исследований [Богатов, 1978, 1994]. Например, при наблюдении за влиянием паводка средней мощности на динамику бентосного сообщества на плесе и перекате полугорной р. Бомнак (паводок проходил с 9 по 14 августа 1975 г. с повышением уровня воды около 1 м) (рис. 2.91, 1) Богатовым [1978] было отмечено, что до паводка плотность организмов на перекате была значительно ниже, а биомасса выше, чем на плесах. Такая разница в биомассе была связана с развитием на перекатах крупных личинок мошек *Gnus subvariegatum*, *Gn. cholodkovskii* и *Simulium vulgare*, а также личинок речейников *Glossosoma altaicum*. На пике паводка количество дрейфующих организмов заметно выросло, причем в поверхностном слое воды их плотность в 1 м^3 оказалась более чем в 50 раз, а биомасса – в 25 раз выше, чем было до паводка (рис. 2.91, 2). После спада воды дрейфт организмов резко снизился, а количество организмов, обитающих в камнях, уменьшилось в 22 раза по численности и в 10 раз по биомассе; в то же время на плесах снижение было меньше – в 11 и 3 раза, соответственно (рис. 2.91, 3, 4). Таким образом, в период паводка наибольшие изменения

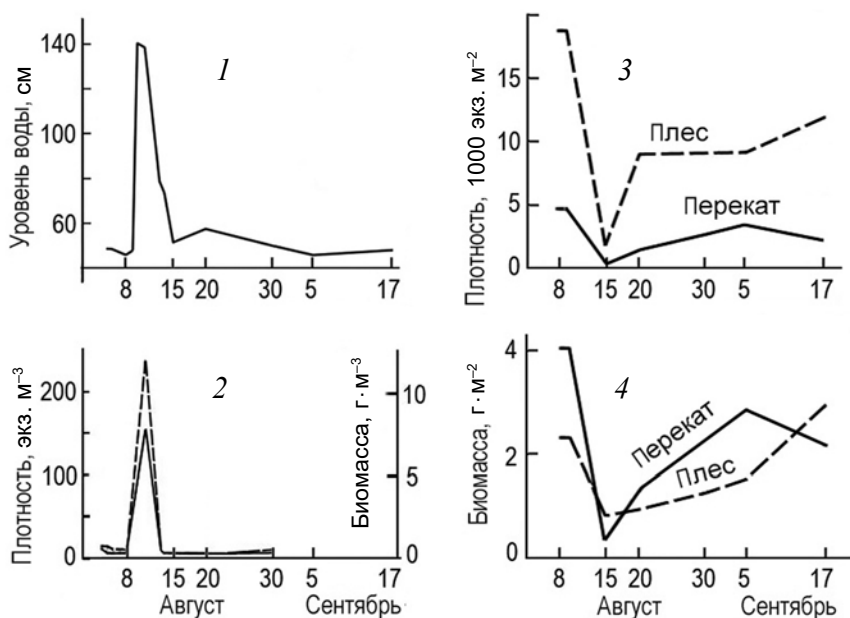


Рис. 2.91. Изменения уровня воды (1), динамика дрейфта бентосных организмов (сплошная линия – плотность, пунктирная – биомасса) (2), динамика плотности (3) и биомассы (4) зообентоса в р. Бомнак, бассейн верхней Зеи. Из: [Богатов, 1978]

численности и биомассы зообентосных организмов произошли на перекате. В течение 2 мес. после паводка плотность организмов на плесе и перекате так и не достигла своих первоначальных значений. В середине сентября биомасса гидробионтов восстановилась только на плесе (рис. 2.91, 4), в основном за счет роста организмов [Богатов, 1978].

Ранее также было показано, что только за один крупный паводок из верховьев рек может выноситься до 30 % от годовой продукции беспозвоночных [Богатов, 1994]. В то же время в силу исторических и геологических предпосылок речные пресноводные сообщества региона отличаются самым высоким в России биологическим разнообразием по сравнению, например, с речными системами Сибири и европейской части России [Леванидов, 1969; Богатов, 1994]. Так, общее число видов пресноводных рыб в бассейне Амура и Южном Приморье – около 150 [Бушуев, Барабанщиков, 2012], а пресноводных моллюсков – 160 видов [Старобогатов и др., 2004]. Исключительным видовым богатством отличается здесь и фауна амфибиотических насекомых [Леванидова, 1982]. Они преобладают во многих лососевых реках и могут достигать до 90 % от биомассы всего бентоса [Тиунова, 2006].

Характерная особенность речных систем юга Дальнего Востока – эвтрофирование зон ритрали и потамали в условиях длительной межени. Особенно выразительно процесс эвтрофикации проявляется в вегетационные сезоны, которым предшествуют малоснежные зимы. Например, если в области ритрали после прохождения весенних половодий концентрация хлорофилла *a* на грунте составляет 2–10 мг/м², то при отсутствии половодья уже к июню эти показатели могут достигать 7 тыс. мг/м². Развитие фитобентоса сопровождается массовой гибелью личинок насекомых, а также личинок и мальков рыб [Богатов, 1994]. В зоне кренали в этот период формируются плотные «пакеты» листового опада, внутри которых развиваются анаэробные процессы. Лишь паводок «спасает» ситуацию: образовавшиеся водорослевые маты и пакеты листового опада сносятся течением, одновременно промываются заиленные участки русла. После завершения паводка массовая гибель беспозвоночных и рыб прекращается, наблюдается быстрое (2–4 декады) формирование многовидового сообщества зообентоса.

В теплое время года при чередовании меженных периодов с паводками небольшой и средней силы гидробионты распределяются по микробиотопам и формируют пятнистую (ячеистую) структуру биоценозов. Например, в пределах структурного звена ритрали «плес–перекат» отмечаются виды личинок поденок, которые обитают исключительно либо на перекате, либо на плесе, а также виды, преобладающие по численности на том или ином участке [Тиунова, 2003]. На примере личинок веснянок было показано существенное влияние на их микрораспределение скорости течения, температуры воды и количества листового опада [Тесленко, Холин, 2005]. Видовой состав беспозвоночных, как правило, различается в прибрежной зоне и на стрежне реки. Выделяются

особые по составу видов сообщества в затишных участках, среди заломов, топляков и ям (рис. 2.92). При меандрирующем русле наблюдается превышение плотности и биомассы зообентоса в зоне размыва грунта над таковыми в зоне осаждения взвесей [Лабай, 2009]. Видовая структура, численность и биомасса зообентоса могут быть связаны с гранулометрическим составом донных отложений. Например, в реках Камчатки устойчиво снижается биомасса и численность зообентоса по мере уменьшения среднего диаметра частиц грунта [Леман, Чебанова, 2005]. В то же время на определенных участках ритрали, несмотря на неустойчивый гидрологический режим и пятнистую структуру биоценозов, десятилетиями отмечается поразительная стабильность в соотношении в среднем за сезон основных таксономических групп гидробионтов (см. рис. 2.54) [Богатов, 1994].

При длительном отсутствии крупных и катастрофических паводков в речных системах региона проявляется континуальность в изменении интегральных структурно-функциональных характеристик сообществ по мере увеличения мощности потока. Как и в других речных бассейнах мира, водосбор которых покрыт лесом, в верховьях дальневосточных рек значительную долю в биотическом балансе составляют аллохтонные органические вещества (ОВ). По мере удаления от истока реки все большее значение в функционировании экосистем приобретает автохтонная органика. Причем в континууме водного потока горных рек были выявлены закономерные изменения в сносимом *сестоне** соотношений фракций органических частиц аллохтон-



Рис. 2.92. Древесные заломы на р. Комаровка (юг Приморского края):
1 – участок кренали, 2 – участок метаритрали. Фото В. Богатова

* Сестон (от греч. *seston* – просеянный) – обитающие в толще воды мелкие организмы (планктон), а также взвешенные в воде неорганические и органические частицы (детрит) с содержащимися на них микроорганизмами, т.е. все, что улавливается из воды мелкоячеистой планктонной сетью. В горных и полугорных реках планктон практически отсутствует.

ного и автохтонного происхождения. В частности, изучение органической составляющей сестона р. Пионерская (водоохранная зона Владивостока), проведенное в конце летне-осенней межени 1991 г., показало, что доля сносимого аллохтонного ОВ (размер взвешенных частиц до 1 мм) максимальна в зоне кренали. По мере продвижения от истоков реки к зоне метаритрали все большее значение приобретало автохтонное ОВ в виде отдельных групп клеток или обрывков нитей водорослей. Доля фрагментов экзுவиев личинок водных насекомых и амфипод на всем исследованном участке реки не изменялась и находилась в пределах 10–20 % от общей сухой массы ОВ (рис. 2.93) [Богатов, 1994].

Многочисленными исследованиями было подтверждено, что именно автотрофные участки дальневосточных рек характеризуются наибольшим таксономическим разнообразием зообентосных сообществ [Алимов, Тесленко, 1988; Вшивкова, 1988; Леванидова и др., 1989; Богатов, 1994; и др.]. В пределах всей зоны метаритрали такие сообщества формируют наиболее сложную структуру, которая может быть оценена индексом Шеннона (H). Например, в хорошо изученной в этом отношении небольшой р. Фроловке (длина 22 км, бассейн р. Партизанская, Приморский край) наибольшие значения индекса Шеннона для зообентоса были зафиксированы в зоне метаритрали (3,98–4,65), а наименьшие – в зоне кренали (2,01–3,00) [Леванидова и др., 1989]. В продольном профиле реки отмечались закономерные изменения в соотношении трофических групп беспозвоночных. В частности, в пределах горного участка Фроловки по мере продвижения от истоков к устью наблюдалось заметное уменьшение доли измельчителей листового опада и увеличение доли фильтрующих коллекторов и хищников-соскребателей (рис. 2.94).

На горном и предгорном участках р. Комаровка (бассейн р. Раздольная, Приморский край) было изучено соотношение структурных характеристик фито- и зообентоса [Богатов и др., 2010]. Как отмечалось выше (раздел 2.5.6), р. Комаровка протекает в зоне хвойно-широколиственных лесов, причем горный и полугорный участки реки

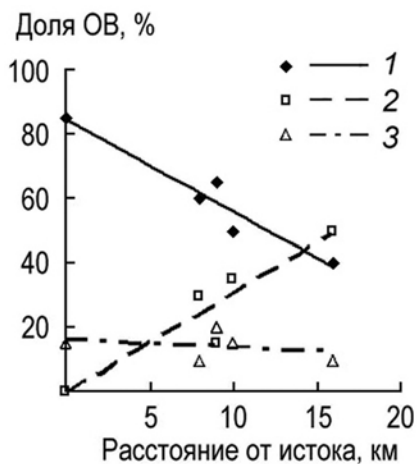


Рис. 2.93. Соотношение макрочастиц (размером до 1 мм) аллохтонного и автохтонного органического вещества (ОВ, % от сухой массы) в дневном сестоне р. Пионерская 12 октября 1991 г.: 1 – аллохтонное ОВ, 2 – клетки водорослей, 3 – фрагменты экзувиев донных беспозвоночных. По материалам Богатова [1994]

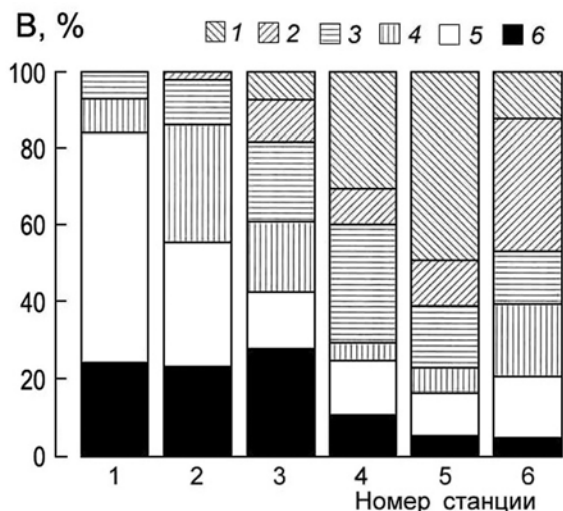


Рис. 2.94. Распределение биомассы (B , %) трофических групп по продольному профилю р. Фроловка: 1 – фильтрующие коллекторы; 2 – хищники-соскребатели; 3 – соскребатели; 4 – коллекторы; 5 – измельчители; 6 – хищники. Из: [Тиунова, 2006]

расположены в Уссурийском заповеднике и не испытывают антропогенного воздействия. Площадь бассейна в пределах исследованного участка составила 670 км². Сборы фито- и зообентоса осуществляли в различные сезоны 1983–1985 и 1989–1993 гг., фитобентоса – 1994, 1999, 2000 и 2017 гг. Для сравнительной характеристики численности и биомассы фито- и зообентосных организмов использованы пробы, собранные в летнюю межень с 8 по 12 июля 1984 г. Видовое разнообразие донных сообществ определяли на базе всего собранного материала. При оценке разнообразия гидробионтов с учетом доминирования каждого таксона приме-

нили индекс Шеннона (H) [Shannon, Weaver, 1949], расчет которого проводился на основе численности организмов.

В результате исследований было показано, что наиболее низкое видовое разнообразие как водорослей, так и беспозвоночных наблюдалось в верховьях реки гетеротрофного участка (до 1 км от истока реки), а наиболее высокое – в центральной части автотрофного участка (8–15 км от истока). В условиях гипоритрали (16–40 км от истока) происходило снижение числа таксонов, что, очевидно, связано с изменением гидрологического и температурного режимов потока при его переходе в полугорный и равнинный участки. Поэтому из сообщества фито- и зообентоса выпадали реофильные таксоны, планктонное же сообщество, характерное для зоны потамали, на данном отрезке реки еще не было сформировано (рис. 2.95).

Общие численность и биомасса водорослей (рис. 2.96, 1, 2) в период летней межени 1994 г. оказались также минимальными в зоне крени (до 1 км от истока), т.е. на самых затененных участках русла. При расширении русла и улучшении освещенности количество и биомасса водорослей возрастали на всем протяжении русла.

Таксономический состав и количественное распределение бентосных животных имели свои особенности (рис. 2.96, 3, 4). В частности, минимальные показатели плотности и биомассы беспозвоночных оказались в зоне перехода

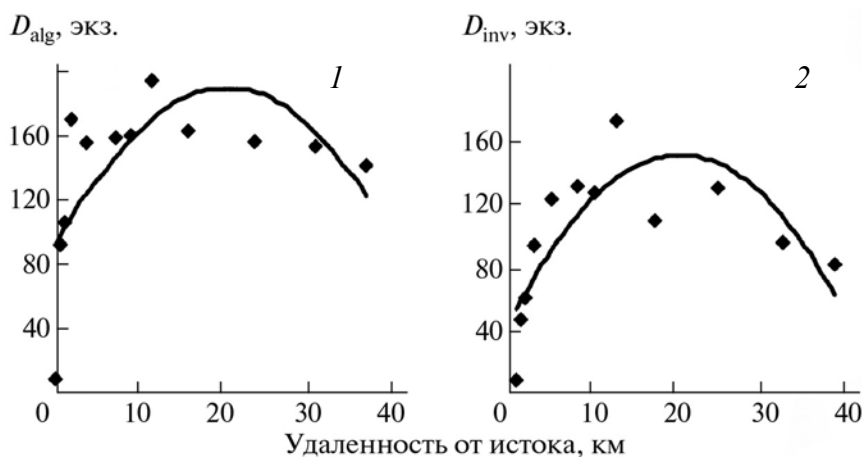


Рис. 2.95. Число таксонов водорослей (D_{alg} , экз.) – (1) и беспозвоночных (D_{inv} , экз.) – (2) в речном континууме горного и полугорного участков р. Комаровка. Из: [Богатов и др., 2010]

гетеротрофного участка в автотрофный, а максимальные – на гетеротрофном (0,5–2 км от истока) и центральном автотрофном (12–16 км от истока) участках реки. Отметим, что в верховьях реки среди донных организмов высокого количественного развития достигали потребители листового опада и грубого детрита. В зоне перехода гетеротрофного участка в автотрофный количество и биомасса детритофагов резко снижались, что отразилось на общих низких количественных показателях зообентоса. В центральном автотрофном участке высокое количественное развитие получили фильтраторы, коллекторы и соскребаатели [Вшивкова, 1988].

Несмотря на сходное изменение в речном континууме таксономического состава водорослей и беспозвоночных индексы Шеннона исследованных групп гидробионтов показали противоположные результаты (рис. 2.96, 3, 6). В частности, наиболее высокие значения индекса разнообразия для фитобентоса отмечены в зоне крениали, а наиболее низкие – в зоне мета- и гипоритрали, а у донных беспозвоночных наоборот: наиболее высокие значения индекса Шеннона – в нижней части метаритрали и на верхней части гипоритрали, а наиболее низкие – в зоне крениали. Выявленный для зообентоса в продольном профиле р. Комаровка ход динамики индекса Шеннона соответствует положениям концепции речного континуума. Аналогичное изменение индекса разнообразия наблюдалось у зообентосных сообществ и в других реках региона. Например, в р. Фроловка, расположенной в юго-западной части горной системы Сихотэ-Алинь, наиболее сложная структура макробентоса также была характерна для зоны мета- и гипоритрали ($H = 3,9–4,6$), а наименее сложная – для зоны крениали ($H = 2,0–3,0$) [Леванидова и др., 1989]. В метаритрали р. Рудная (восточная

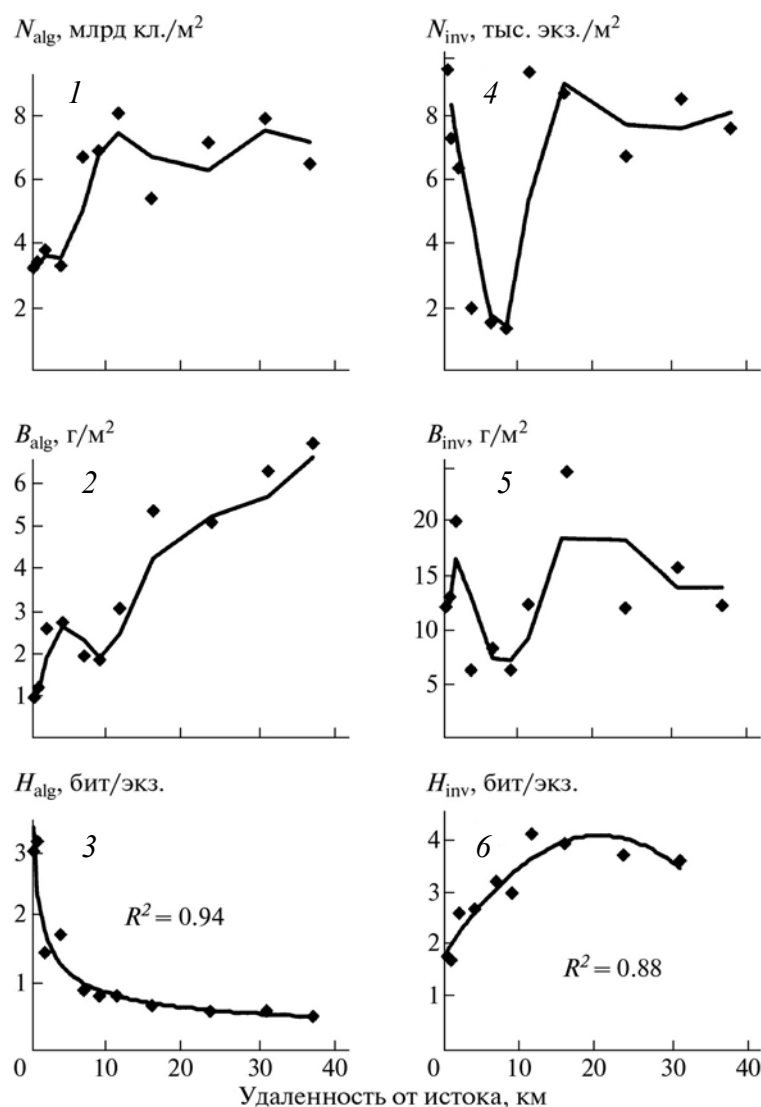


Рис. 2.96. Плотность (N_{alg} , N_{inv}), биомасса (B_{alg} , B_{inv}) и индекс Шеннона (H_{alg} , H_{inv}) водорослей (1–3) и беспозвоночных (4–6) в продольном профиле р. Комаровка. Из: [Богатов и др., 2010]

часть Сихотэ-Алиня) у беспозвоночных также наблюдалось высокое значение индекса Шеннона – 2,6–3,9 [Алимов, Тесленко, 1988]. Отметим, что указанные структурные характеристики зообентоса проявляются при низких и средних значениях биомассы водорослей. Однако в условиях гиперэвтрофикации происходит упрощение структуры бентосных беспозвоночных [Богатов, 1994].

Важно, что по результатам исследования была отмечена прямая взаимосвязь видового богатства фито- и зообентоса (рис. 2.97, 1), в то же время индексы

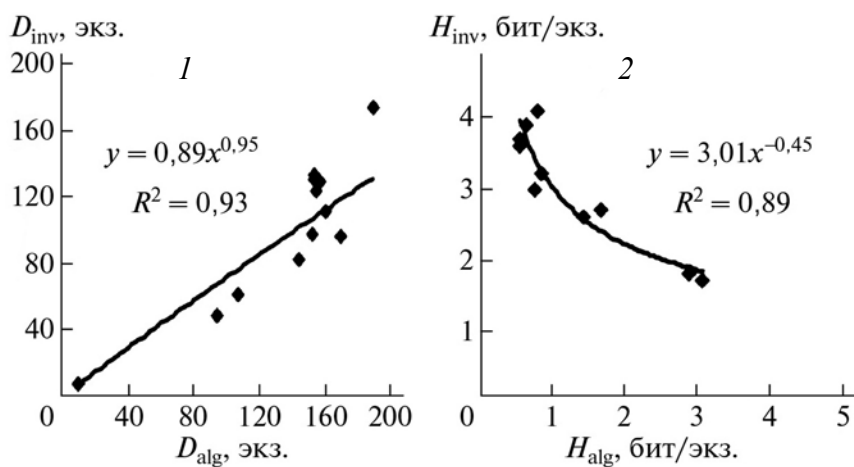


Рис. 2.97. Взаимосвязь между числом таксонов беспозвоночных (D_{inv} , экз.) и числом таксонов водорослей (D_{alg} , экз.) – (1), а также между индексом Шеннона сообществ беспозвоночных (H_{inv}) и водорослей (H_{alg}) – (2) в р. Комаровка. Из: [Богатов и др., 2010]

Шеннона исследованных групп организмов в продольном профиле реки находились между собой в обратной зависимости (рис. 2.97, 2). Таким образом, наблюдаемое в континууме реки увеличение таксономического разнообразия зообентосного сообщества сопровождается усложнением его структуры, а увеличение таксономического разнообразия фитоперифитона происходит на фоне увеличения биомассы и возрастания степени доминирования ограниченного числа видов водорослей. Иными словами, если высокое биотическое разнообразие зообентосного сообщества в автотрофной зоне реки поддерживается за счет относительно высокой, по сравнению с гетеротрофным участком, продукции фитобентоса, то повышенный уровень первичной продукции достигается за счет развития ограниченного числа видов водорослей.

Данные о резком увеличении таксономического состава и количественного развития водорослей по мере расширения русла указывают на важнейшую роль светового фактора в формировании фитоценозов. Это обстоятельство косвенно подтверждает положение Хатчинсона [Hutchinson, 1964] о том, что на реках малых порядков водоросли не испытывают недостатка в биогенных элементах. В то же время при прочих равных условиях химический состав воды [Biggs, 1990, 1995] и скорость течения [Stevenson, 1996] могут играть определяющую роль в формировании речных фитоценозов.

Отмеченная в Комаровке сходная картина увеличения числа видов фито- и зообентоса в речном континууме (рис. 2.97, 1) свидетельствует о наличии общих механизмов формирования и поддержания многовидовых сообществ этих групп гидробионтов. Скорее всего, на горных участках дальневосточных рек подобные механизмы связаны с разнообразием параметров среды и их

динамикой, в том числе с разнообразием рефугиумов, позволяющих организмам переживать неблагоприятные природные явления (паводки, засуха, промерзание русла) [Богатов, 2001], а также с функциональными особенностями водосборных бассейнов [Богатов и др., 2013]. Тем не менее наличие в период межени четко выраженной продольной континуальности в изменениях индекса Шеннона фито- и зообентосных сообществ, трофической структуры беспозвоночных, соотношения в потоке органических частиц разного генезиса и т.п. указывает на оправданность применения положений комбинированной концепции функционирования речных экосистем [Богатов, 1995], представляющей собой синтез концепций речного континуума [Vannote et al., 1980] и динамики ячеек/пятен [Townsend, 1989].

Таким образом, заключить, что реки зоны муссонного климата относятся к особой группе природных комплексов, в которых ведущую роль в регулировании играют экстремальные природные явления. В отсутствии паводков в речной системе происходит формирование континуума интегральных структурно-функциональных характеристик сообществ гидробионтов, соответствующее основным положениям концепции речного континуума [Vannote et al., 1980]. В то же время на отдельных участках русла одновременно появляется специфическая «пятнистая» структура речных гидробионтов (сообщества плесов, перекатов, заливов, затонов, заломов и пр.). Было подтверждено, что именно автотрофные участки отличаются наиболее сложной структурой зообентосных сообществ, для которой характерны высокие значения индекса Шеннона. Здесь необходимо напомнить, что в целом речные экосистемы южной части Дальнего Востока по сравнению с экосистемами других крупных речных бассейнов России (например, Волги, Оби, Енисея, Лены и др.) отличаются большим видовым богатством и количественным развитием биоты. Парадокс заключается в том, что речные системы Дальнего Востока постоянно подвергаются воздействию больших и катастрофических паводков, в результате которых биомасса фито- и зообентосных организмов резко снижается. В то же время редкие катастрофические паводки не разрушают структуру речных экосистем, а периодическое чередование паводков средней и малой силы с меженными периодами в целом благоприятно сказывается на гидробиологическом режиме рек. По-видимому, такое чередование является важнейшим фактором стабильного существования речных экосистем, поскольку только при этом условии может поддерживаться их динамичный облик и высокое разнообразие. Высказанные положения хорошо согласуются с *гипотезой промежуточных нарушений (intermediate disturbance hypothesis)*, выдвинутой Гриммом [Grime, 1973] и Коннеллом [Connell, 1978], которые постулировали максимальное разнообразие в экосистемах при промежуточных (средних) уровнях возмущающих воздействий.

2.6.3. Речные экосистемы в условиях глобального изменения климата

Системой государственного мониторинга Российской Федерации установлено, что во временном ряду аномалий температуры приземного воздуха, осредненных по территории России, период после 1976 г. характеризуется интенсивным потеплением (рис. 2.98, 2.99) [Фролов, 2014; Бардин и др., 2017]. По сравнению с базовым периодом усреднения (1961–1990 гг.), линейный тренд за 1976–2016 гг. составляет около 0,43 и 0,39 °C / 10 лет для страны и юга Дальнего Востока России (ДВР) соответственно [Фролов, 2014; Bogatov, Fedorovskiy, 2016]. В целом, ход изменения климата России (в том числе южной части ДВР) следует характеризовать как длительное нагревание, которое более чем в 2 раза превышает скорость осредненного глобального потепления [Фролов, 2014; Бардин и др., 2017].

Потепление в Российской Федерации сопровождается увеличением опасных метеорологических явлений и комплексов неблагоприятных метеорологических природных явлений, причем 2016 г. показал наибольшее количество таких опасных явлений за все 18 лет наблюдений (рис. 2.100). Прогнозируется дальнейший рост метеорологических опасных явлений в коротких и средних

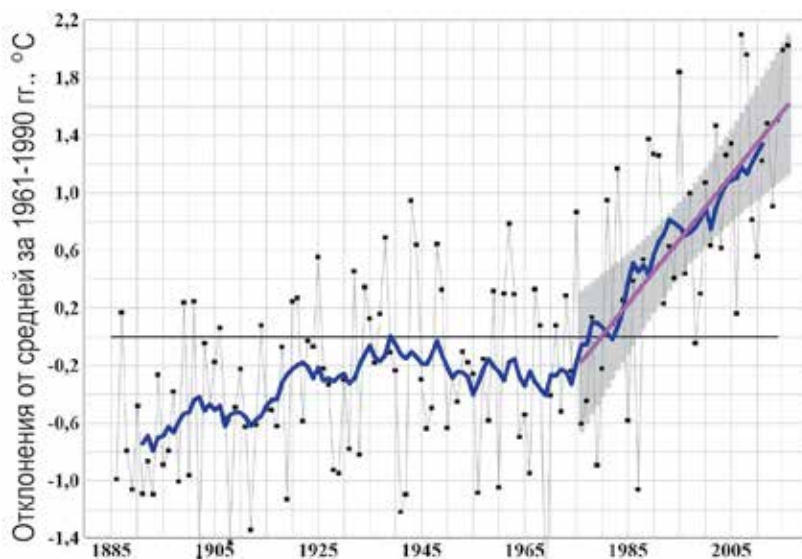


Рис. 2.98. Изменение аномалий среднегодовой поверхностной температуры приземного воздуха, осредненных по территории России с 1886 по 2016 г.: аномалии рассчитаны как отклонение от средней температуры за 1961–1990 гг.; жирная синяя линия – сглаженный ход температуры (11-летние скользящие средние); вертикальные сегменты – 95 %-ный доверительный интервал для 11-летних средних; малиновая линия – тренд за 1976–2016 гг.

Из: [Бардин и др., 2017]

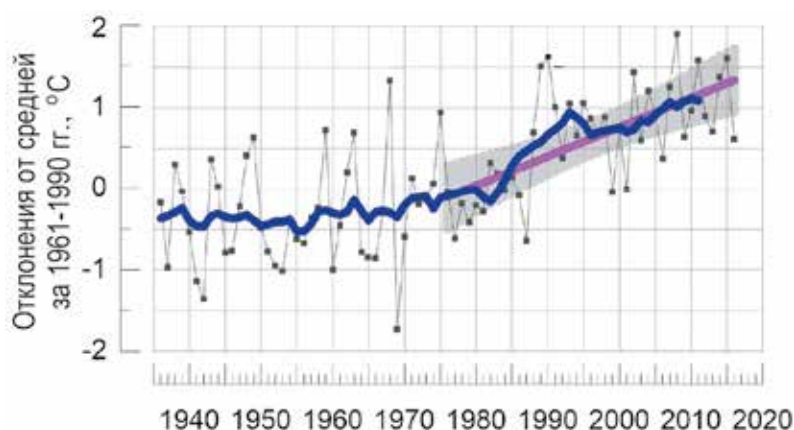


Рис. 2.99. Годовые аномалии температуры приземного воздуха для Приамурья и Приморья за 1936–2016 гг. Обозначения те же, что и на рис. 2.98. Из: [Бардин и др., 2017]

масштабах времени [Lawford, 2006; Груза и др., 2017], в том числе на юге Дальнего Востока России [Bogatov, Federovskiy, 2016]. В частности, в Дальневосточном регионе в последнее время наблюдаются как аномально многоводные, так и аномально маловодные годы и сезоны редкой повторяемости. Среди них: аномально маловодные 2007 и 2008 гг. в бассейне Амура и необычайно высокое наводнение в начале осени 2013 г. на Среднем и Нижнем Амуре [Фролов, 2014]; чрезвычайно высокий уровень воды на оз. Ханка в 2013–2015 гг. [Журавлев, Клышевская, 2015] и в 2016 г. К аномальным явлениям редкой повторяемости относится и экстремально высокий паводок на реках Приморья поздней осенью 2012 г., в результате которого многие реки

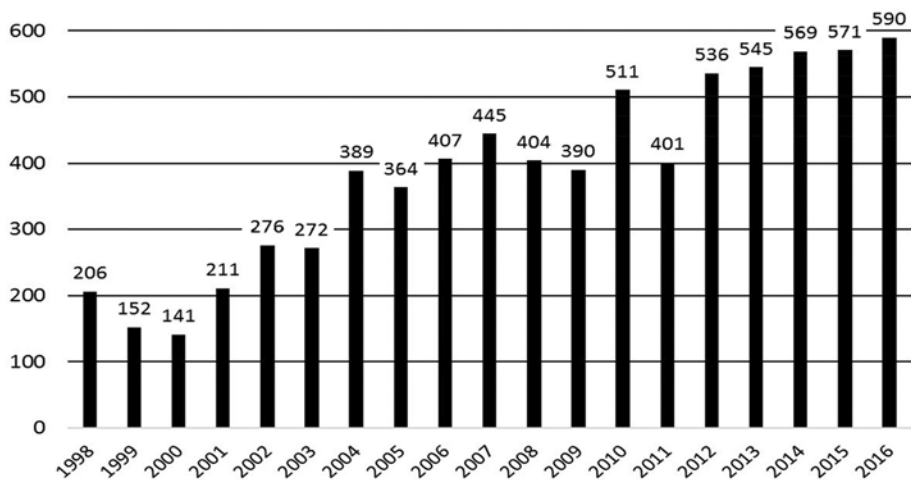


Рис. 2.100. Распределение опасных метеорологических явлений и комплексов неблагоприятных метеорологических природных явлений по годам. Из: [Груза и др., 2017]

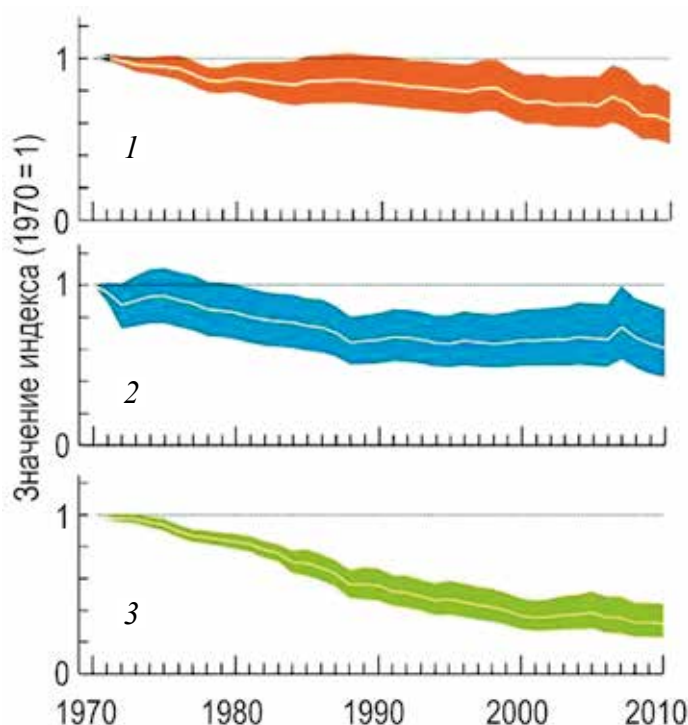


Рис. 2.101. Индекс живой планеты для наземных (1), морских (2) и пресноводных (3) видов. Белая линия соответствует рассчитанному значению индекса, закрашенная область – 95 %-ному доверительному интервалу. Из: [Маклеллан и др., 2014]

ушли под лед при большом наполнении их русел, что не случалось ранее. Установлено, что повторяемость этого явления, приблизительно, может быть оценена до 1 раза в 500–1000 лет [Гарцман и др., 2014]. Это неамного ниже, чем экстраординарный паводок на Амуре осенью 2013 г.

Считается, что увеличение гидрологических крайностей (нелинейный ответ на колебание климата) может стать началом значительного изменения гидрологического режима пресноводных объектов в целом [Фролов, 2014].

На фоне глобального потепления климата повсеместно отмечается снижение глобального индекса живой планеты (ИЖП)*. По уточненным данным

* Индекс живой планеты (ИЖП) – отражает усредненную динамику 10380 популяций 3038 видов позвоночных животных: млекопитающих, птиц, пресмыкающихся и рыб. Детальные наблюдения за этими группами животных ведутся на протяжении многих лет. Глобальный ИЖП рассчитывается усреднением индексов для наземной, пресноводной и морской систем. Расчет ИЖП проводится специалистами Лондонского зоологического общества, которые для этого используют оценки количества видов в каждой таксономической группе для каждой биогеографической области и присваивают пропорциональные этому количеству определенные веса (выполняется взвешенное усреднение по таксономическим группам в пределах области). В результате динамика групп и областей с наиболь-

WWF (World Wildlife Fund – Всемирный фонд дикой природы), с 1970 по 2010 г. глобальный ИЖП снизился на 52 % [Маклеллан и др., 2014]. Это означает, что всего за 40 лет численность популяций позвоночных животных на земном шаре уменьшилась вдвое. Наиболее значительное снижение региональных ИЖП зафиксировано в Южной Америке (83 %), за ней с небольшим отрывом следует Азиатско-Тихоокеанский регион (67 %). В России вместе с Европой и северной Африкой индекс живой планеты в среднем сократился на 30 %. Установлено, что потеря биоразнообразия в пресноводных экосистемах снижается быстрее, чем в наземных и морских (рис. 2.101). В частности, из проведенных расчетов следует, что численность популяций пресноводных видов за 40 лет снизилась на 76 %, что значительно превышает темпы снижения численности для морских (39 %) и наземных (39 %) видов. Снижение числа пресноводных видов связано с потерей и фрагментацией местообитаний, загрязнением и вселением чужеродных видов [Collen et al., 2014; Маклеллан и др., 2014]. Тот факт, что пресноводные виды находятся в гораздо худшем состоянии, чем наземные, подтверждается другими исследователями [Collen et al., 2014; Darwall et al., 2011; Cumberlidge et al., 2009]. Важно отметить, что эффективность охраны видов в охраняемых природных акваториях заметно ниже, чем на особо охраняемых территориях суши [Маклеллан и др., 2014]. Например, по нашим наблюдениям, в пределах заповедника «Кедровая Падь» в 1990-е годы из экосистемы р. Кедровая исчезла популяция речных раков, а в заповеднике «Уссурийский» в начале 2000-х годов из верховий р. Комаровка исчезла популяция приморской жемчужницы *Dahurinaia suifunensis* Moskv. Возможно, это связано с тем, что модели охраны наземных экосистем малоприменимы к сложным и взаимосвязанным пресноводным экосистемам.

Модельные оценки [Фролов, 2014] указывают на то, что в XXI в. Россия останется регионом мира, где потепление климата будет заметно превышать среднее глобальное потепление. К концу XXI в. на юге Российской Федерации произойдет заметное повышение наиболее низкой температуры воздуха, что приведет к бесснежным зимам. Прогнозируемое повышение температуры воздуха зимой позволяет полагать, что повышенный зимний сток рек сохранится, при этом относительная доля весеннего стока в годовом стоке будет уменьшаться. При ожидаемом изменении климата произойдет заметное уменьшение оледенения гор на юге Европейской части России и Сибири. Уменьшение ледникового стока может повлечь за собой ухудшение качества воды в реках, имеющих существенное ледниковое и снеговое питание из снега высокогорий. Талая ледниковая вода является стабилизатором стока рек в теплое время года,

шим количеством видов оказывает наибольшее влияние на итоговый индекс, а групп и областей с наименьшим количеством видов – наименьшее. Публикуемый в 2014 г. ИЖП отражает динамику численности популяций на протяжении 40 лет – с 1970 по 2010 г., поскольку база данных ИЖП охватывает период только после 1970 г. [Маклеллан и др., 2014].

сток которых без подобной добавки может существенно уменьшиться в этот период [Фролов, 2014].

По данным Росгидромета [Фролов, 2014; Груза и др., 2017], изменения осадков в разных федеральных округах будут заметно различаться. В частности, в летний период увеличение средних за сезон сумм осадков ожидается на большей части территории России, за исключением южных регионов. На водосборах Лены и Енисея, а также рек Чукотки прогнозируется значимое увеличение стока. Для значительной части Европейской территории России, где максимальные расходы воды в реках формируются в период весеннего половодья, в последние десятилетия произошло существенное его уменьшение. В регионах, где максимальные расходы формируются дождевыми паводками (Черноморское побережье Кавказа, бассейны Кубани и Амура), в конце прошлого – начале нынешнего столетия отмечались катастрофические наводнения, не наблюдавшиеся ранее.

Существенной особенностью современных изменений водного режима рек является увеличение межгодовой изменчивости стока, в результате чего все чаще будут наблюдаться как аномально многоводные, так и аномально маловодные годы и сезоны (т.е. ожидается больше крайностей) [Moss, 2010; Strayer, Dudgeon, 2010; Goldman et al., 2013; Фролов, 2014; и др.]. Известно, что чрезмерно резкие паводки приводят к быстрому количественному истощению фито- и зообентоса, тогда как длительная межень, особенно при отсутствии весеннего половодья, может спровоцировать гиперэвтрофикацию водных объектов, причем как в горных (рис. 2.102, 1, 2), так и в равнинных (рис. 2.102, 3, 4) реках. В целом, продолжительные засухи увеличат вероятность возникновения лесных пожаров, которые приводят к огромной потере лесных ресурсов и опустыниванию территорий [Цветков, Буряк, 2014] (рис. 2.103), провоцируют обмеление потоков и, как следствие, оказывают негативное влияние на промыслы. Эти изменения могут быть особенно опасными на фоне других видов воздействия человека на леса: рубок, добычи полезных ископаемых, фрагментации лесных ландшафтов и т.п. В водоразделах, где произошел лесной пожар, наблюдается усиление эрозионных процессов, изменение гидрологического, температурного и химического режимов рек, увеличение их мутности [Rhoades et al., 2011] и, как следствие, значительная потеря разнообразия речных организмов [Алимов и др., 2013].

Важно отметить, что, по данным Гринпис России [Журавлева, Ярошенко, 2014], в последние 25 лет северные леса особенно часто горят в Приамурье, Забайкалье, верхнем Приангарье, в центральной и восточной Якутии, лесостепных районах западной и средней Сибири, центральных районах средней Сибири, на северо-востоке Аляски, севере провинций Альберта и Саскачеван (Канада), а также на северо-западе Канады и США. По материалам Росгидромета [Фролов, 2014], за последние 20–30 лет частота пожаров в сибирских

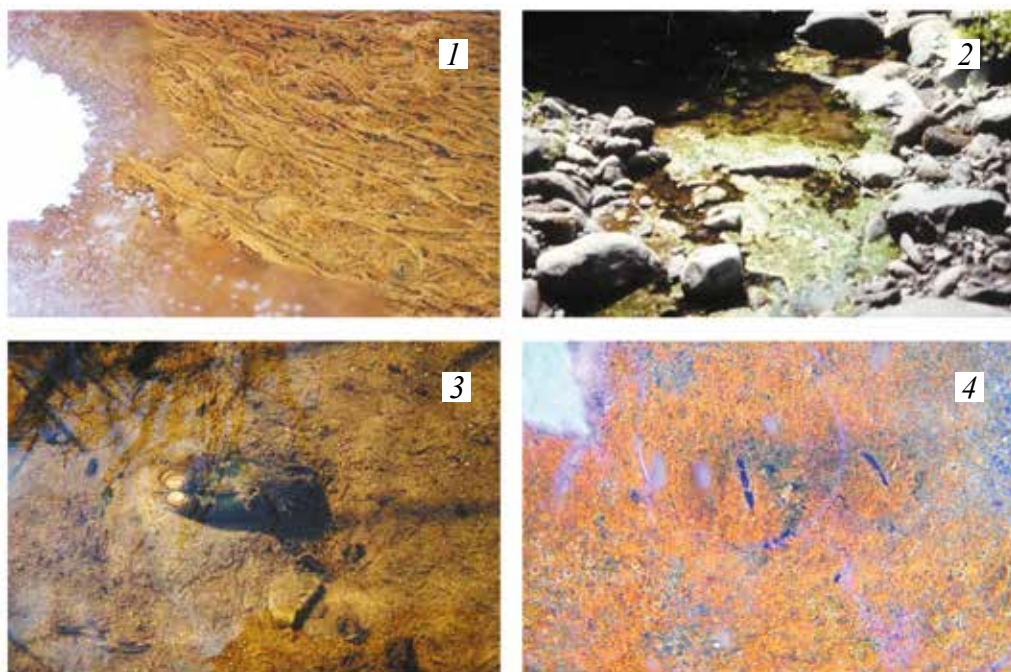


Рис. 2.102. Развитие диатомовых водорослей на гравийно-галечном грунте в верховьях р. Уссури в феврале 2013 г. (1); водорослевые обрастания (в основном цианобактерии и зеленые водоросли) в горном ручье Сихотэ-Алиня в июне (2); песчаный грунт на равнинной р. Ивица (бассейн Верхней Волги) в августе средневодного 2012 г. (3); тот же участок р. Ивица в августе маловодного 2013 г. с развитым водорослево-бактериальным матом (4).

Фото В. Богатова

лесах, Эвенкии, Хабаровском крае возросла на 30–50 %. Кроме того, с 1973 по 2010 г. в лесах России вдвое больше стала площадь очагов размножения вредных насекомых и болезней. Прогнозируется дальнейшая эскалация пожарных режимов и увеличение масштабов и темпов размножения насекомых-вредителей, что усилит процесс повреждения и гибели лесов. Согласно существующим оценкам, на всей ЕЧР, в западной, частично в восточной части Сибири, в Приморском крае и на Сахалине увеличится пожароопасный период на 20–29 сут, а на некоторых участках – на 30–50 сут. При умеренном сценарии воздействия на климат в тех же регионах ожидается увеличение пожароопасного периода на 10–19 сут [Фролов, 2014]. Необходимо обратить внимание, что, например, по отношению к территории южной части Дальнего Востока прогнозируется усиление пожароопасного режима для регионов (Приморский край и о-в Сахалин), которые в настоящее время по горимости лесов относятся к благополучным территориям (рис. 2.104).

Понятно, что расширение пожароопасных сезонов будет сопровождаться ростом горючести лесов и количества пожаров. На поврежденных пожарами



Рис. 2.103. Лесная территория после крупного пожара (Хабаровский край, юго-западное побережье Охотского моря, август 2010 г.). Фото В. Богатова

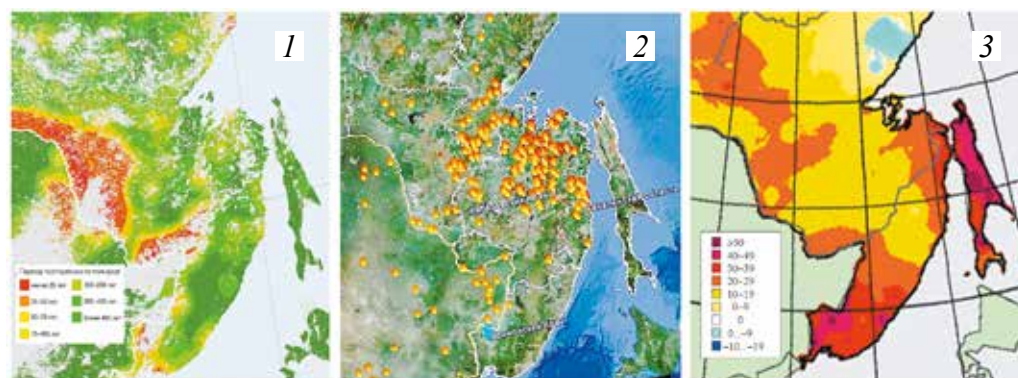


Рис. 2.104. Периоды повторяемости пожаров в северных лесах мира (1), фрагмент карты из: [Журавлева, Ярошенко, 2014]; основные очаги пожаров в Дальневосточном регионе 6 июля 2012 г. (2), фрагмент карты из информационной системы Fire Information for Resource Management System; перспективная оценка изменения среднего числа пожароопасных суток в году (май–сентябрь) за 2080–2099 гг. по сравнению с 1981–2000 гг. (3), фрагмент карты из: [Фролов, 2014]

лесных территориях водозащитные функции почв и лесов значительно снизятся, одновременно расширятся процессы опустынивания земель. Кроме того, продолжительный сухой сезон, вырубка лесов, чрезмерный выпас скота и пр. могут спровоцировать дополнительное увеличение частоты экстремальных маловодных событий в озерах и реках [Фролов, 2014].

Предполагаемое изменение природных циклов наводнений, вызванное глобальными изменениями климата, на фоне прогрессирующего исчезновения лесной растительности, усиления антропогенной нагрузки и при отсутствии превентивных мер может нарушить экологическое равновесие в большинстве регионов земного шара. В частности, увеличение числа экстремальных гидрологических событий может вызвать гибель рыб на наиболее чувствительных стадиях их развития (икра, зародыши, личинки), а изменения частоты или интенсивности паводков могут повлиять на способность взрослых рыб успешно достигать нерестилищ [Harrod et al., 2007]. Кроме того, повышение температуры воды, во-первых, вызовет изменение жизненных циклов гидробионтов (например, у проходных лососевых рыб более ранний выход зародышей из грунта и более раннее попадание подросшей молоди в морскую среду, когда пищевые ресурсы еще недостаточны) [Bryant, 2009]; во-вторых, спровоцирует замену холодноводных видов беспозвоночных и рыб на термофильные виды [Daufresne et al., 2004, 2009], при этом средние размеры гидробионтов станут меньше [Daufresne et al., 2009]. Продолжатся опережающие, по сравнению с наземными и морскими системами, необратимые потери биоразнообразия в пресных водах [Dudgeon, 2010; Woodward et al., 2010; и др.], особенно уязвима к изменениям климата окажется фауна горных ручьев [Isaak et al., 2010]. В то же время предполагаемое изменение трофической структуры речных сообществ (уменьшение числа биотических взаимосвязей) в условиях потепления климата будет иметь критические последствия и для функционирования тропических водных экосистем [Pires et al., 2016]. Прогнозируется дальнейшая деградация местообитаний речных организмов, в том числе снижение качества питьевой воды и рыбохозяйственной значимости водных объектов, увеличение зараженности промысловых гидробионтов гельминтами и усиление инвазий чужеродных видов в водные экосистемы [Vorosmarty et al., 2010; Bogatov, Fedorovskiy, 2016].

Стратегическое обеспечение продукционного потенциала реобиомов и сохранения качества пресных вод заключается прежде всего в оптимизации пользования водными ресурсами, особое внимание при этом должно быть уделено схемам размещения гидросооружений (плотин, дамб и пр.), нарушающих целостность речных экосистем, и водоемким предприятиям. В лесных районах необходимо обеспечить сохранность лесного фонда, как важнейшего стабилизирующего фактора в поддержании влагооборота, с обязательным восстановлением эффективной службы пожарной охраны лесов. Необходимо

активизировать деятельность по снижению уровня загрязнения пресных вод, в том числе транснационального; сохранению благоприятного гидрологического, гидрохимического и гидробиологического режимов в реках, имеющих рыбохозяйственное значение; приоритетной сохранности нерестилищ осетровых, лососевых и других ценных пород рыб при реализации крупных хозяйственных объектов (строительство нефте- и газопроводов, размещение промышленных предприятий и пр.); возрождению государственной службы гидробиологического мониторинга; организации контроля за биогенной нагрузкой на водные экосистемы, инвазиями чужеродных видов гидробионтов, в том числе возбудителей опасных паразитозов; более жесткому регулированию промысла и развитию рыбохозяйственных комплексов по искусственному воспроизводству особо ценных рыб и беспозвоночных; активизации исследований динамики биологического разнообразия и биоресурсов реобиомов, направленных на моделирование процессов функционирования речных сообществ и потери видов при разных трофических и гидрологических условиях.

ЛИТЕРАТУРА

- Абакумов В.А. (ред.). Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 240 с.
- Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 444 с.
- Алексеев В.Р., Цалолихин С.Я. (ред.). Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 2. Зообентос / ред. С.Я. Цалолихин. М.; СПб.: Т-во науч. изданий КМК, 2016. 457 с.
- Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: Геогр. факультет МГУ, 1998. 202 с.
- Алексеевский Н.И. Гидрофизика. М.: Академия, 2006. 176 с.
- Алексеевский Н.И., Чалов Р.С. Движение наносов и русловые процессы. М.: МГУ, 1997. 170 с.
- Алимов А.Ф. Введение в продукционную гидробиологию. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 152 с.
- Алимов А.Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем. СПб.: Наука, 2000. 147 с.
- Алимов А.Ф. Еще раз об экологии. М.; СПб.: Т-во науч. изданий КМК, 2016. 62 с.
- Алимов А.Ф., Богатов В.В. Рост беззубки *Anodonta piscinalis* в водохранилищах Калининской области // Зоол. журн. 1975. Т. 54, № 1. С. 27–31.
- Алимов А.Ф., Богатов В.В., Голубков С.М. Продукционная гидробиология. СПб.: Наука, 2013. 343 с.
- Алимов А.Ф., Тесленко В.А. Структурно-функциональные характеристики речного зообентоса в зоне антропогенных воздействий // Гидробиол. журн. 1988. Т. 24, № 2. С. 27–31.
- Асаул З.И. Определитель эвгленовых водорослей Украинской ССР. Киев: Наукова думка, 1975. 408 с. (На укр. яз.).
- Ассман А.В. Роль водорослевых обрастаний в образовании органического вещества в Глубоком озере // Тр. ВГБО. 1953. Т. 5. С. 138–157.
- Астахов М.В. Осенний дрейф в реке Кедровой (Приморский Край) // Чтения памяти В.Я. Леванидова. Вып. 4. Владивосток: Дальнаука, 2008. С. 93–107.
- Астахов М.В. Дрейф фито- и зообентоса в модельной лососевой реке Кедровой (Приморский край, Россия): дис. ... канд. биол. наук. Владивосток, 2009. 130 с.
- Астахов М.В. [Astakhov M.V.]. Stratifying Drift Sampler // Амурский зоол. журн. [Amurian Zoological J.]. 2012. Т. 4, № 1. С. 3–8.
- Астахов М.В. Динамика поступлений наземных беспозвоночных в пищевую сеть малой лососевой реки // Сибир. экол. журн. 2016. № 4. С. 575–583.
- Астахов М.В. Метод реконструкции динамики пополнения популяций раковинных моллюсков // Зоол. журн. 2017. Т. 96. С. 597–600.
- Баканов А.И. Использование зообентоса для мониторинга пресноводных водоемов // Биология внутр. вод. 2000. № 1. С. 68–82.
- Балушкина Е.В. Функциональное значение личинок хирономид в континентальных водоемах. Л.: Наука, 1987. 179 с.
- Бардин М.Ю., Груза Г.В., Ранькова Э.Я. и др. Изменения климата; 2016 год (декабрь 2015 – ноябрь 2016). Обзор состояния и тенденций изменения климата России. М.: ИГКЭ Росгидромета и РАН, 2017. 42 с.
- Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Pilies Studio, 2006. 498 с.

Барышев И.А. Реофильные сообщества донных беспозвоночных притоков Онежского озера и Белого моря: автореф. дис. ... канд. биол. наук / Петрозавод. гос. ун-т. Петрозаводск, 2001. 24 с.

Безель В.С., Баканов А.И., Крамаренко С.С. и др. Экологический мониторинг. Методы биологического и физико-химического мониторинга. Т. 6. Нижний Новгород: Изд-во Нижегород. гос. ун-та им. Н.И. Лобачевского, 2006. 371 с.

Беклемишев В.Н. Биоценозы реки и речной долины в составе живого покрова Земли // Тр. ВГБО. 1956. Т. 7. С. 77–97.

Берг Л.С. Рыбы пресных вод СССР и сопредельных стран. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1948. Ч. 1. 468 с.; 1949а. Ч. 2. С. 469–928; 1949б. Ч. 3. С. 929–1384.

Берлянт А.М. Картография. М.: Аспект Пресс, 2002. 338 с.

Бефани А.Н., Урываев П.А., Бефани Н.Ф. и др. Экспериментальные исследования дождевого стока в Приморье // Тр. ДВНИГМИ. 1967. Вып. 24. С. 7–18.

Бефани Н.Ф. Прогнозирование дождевых паводков на основе территориально-общих зависимостей. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 182 с.

Бобрик К.П., Лисина И.А. Водные ресурсы рек и водообеспеченность Приморского края. Владивосток. Изд-во Дальневост. ун-та, 2001. 140 с.

Богатов В.В. Влияние паводка на снос бентоса в реке Бомнак (бассейн реки Зеи) // Экология. 1978. № 5. С. 36–41.

Богатов В.В. Методы определения дистанции дрейфа донных беспозвоночных (на примере р. Буреи) // Экология. 1979. № 4. С. 82–88.

Богатов В.В. Дрейф речного бентоса // Биология пресных вод Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984а. С. 107–120.

Богатов В.В. Значение бентостока в процессах биологического продуцирования в реках // Экология. 1984б. № 3. С. 51–60.

Богатов В.В. Метод расчета миграционной активности и дистанции дрейфа бентоса в крупных реках // Гидробиол. журн. 1985. Т. 21, № 3. С. 86–89.

Богатов В.В. Классификация дрейфа речного бентоса // Гидробиол. журн. 1988. Т. 24, № 1. С. 29–33.

Богатов В.В. Рост и продукция амфипод в реках южного Приморья // Гидробиол. журн. 1991. Т. 27, № 1. С. 39–46.

Богатов В.В. Экология речных сообществ российского Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 1994. 218 с.

Богатов В.В. Комбинированная концепция функционирования речных экосистем // Вестн. ДВО РАН. 1995. № 3. С. 51–61.

Богатов В.В. Роль экстремальных природных явлений в функционировании речных сообществ российского Дальнего Востока // Чтения памяти В.Я. Леванидова. Вып. 1. Владивосток: Дальнаука, 2001. С. 22–24.

Богатов В.В. Основные методы изучения дрейфа речного бентоса // Чтения памяти В.Я. Леванидова. Вып. 3. Владивосток: Дальнаука, 2005. С. 5–17.

Богатов В.В. Соотношение биомассы и дрейфа у речных бентосных беспозвоночных // Биология внутр. вод. 2014. Т. 7, № 2. С. 69–75.

Богатов В.В., Астахов М.В. Подледный дрейф беспозвоночных на предгорном участке реки Кедровая (Приморский край) // Биология внутр. вод. 2011. № 1. С. 62–70.

Богатов В.В., Астахов М.В. Вертикальное распределение дрейфующих личинок поденок и двукрылых на перекате р. Кедровая (Приморский край) // Вестн. СВНЦ ДВО РАН. 2013. № 1. С. 39–48.

Богатов В.В., Микелл Д., Розенберг В.А. и др. Стратегия сохранения биоразнообразия Сихотэ-Алиня. Владивосток: ДВО РАН / Всемирный фонд дикой природы. 2000. 136 с.

Богатов В.В., Никулина Т.В. Распределение водорослей в континууме р. Комаровки (Приморский край, Россия) // Вестн. СВНЦ ДВО РАН. 2009. № 3. С. 30–39.

Богатов В.В., Никулина Т.В. Связь видового разнообразия сообществ водорослей с площадью водосбора рек юга Дальнего Востока России // Биология внутр. вод. 2010. № 3. С. 47–51.

Богатов В.В., Никулина Т.В., Астахов М.В. Колонизация керамической плитки бентосными водорослями в р. Кедровая (Приморский край, Россия) // Вестн. СВНЦ ДВО РАН. 2009. № 1. С. 33–41.

Богатов В.В., Никулина Т.В., Вишкова Т.С. Соотношение биоразнообразия фито- и зообентоса в континууме модельной горной реки Комаровки (Приморский край, Россия) // Экология. 2010. № 2. С. 134–140.

Богатов В.В., Федоровский А.С., Никулина Т.В. Роль гидрологических факторов в формировании видового разнообразия сообществ водорослей (на примере р. Комаровка, Приморский край, Россия) // Экология. 2013. № 6. С. 428–435.

Богущая Н.Г., Насека А.М. Каталог бесчелюстных и рыб пресных и солоноватых вод России с номенклатурными и таксономическими комментариями. М.: Т-во науч. изданий КМК, 2004. 389 с.

Борсук О.А. Структурно-тектоническая предопределенность заложения речных долин горных стран и особенности их развития // Структурная геоморфология горных стран. Фрунзе, 1973. С. 55–56.

Боруцкий Е.В., Ключарева О.А., Никольский Г.В. Донные беспозвоночные (зообентос) Амура и их роль в питании амурских рыб // Тр. Амурской ихтиологической экспедиции 1945–1949 гг. М.: МОИП, 1952. Т. 3. С. 5–139. (Новая серия; вып. 32).

Брагинский Л.П. Методологические аспекты токсикологического биотестирования на *Daphnia magna* Str. и других ветвистоусых ракообразных (критический обзор) // Гидро-биол. журн. 2000. Т. 36, № 5. С. 50–70.

Бредшоу М.Дж. Современная геология: пер. с англ. Л.: Недра, 1977. 279 с.

Бродский К.А. Горный поток Тянь-Шаня. Эколого-фаунистический очерк. Л.: Наука, 1976. 224 с.

Бульон В.В. Первичная продукция планктона // Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Фитопланктон и его продукция. Л.: Наука, 1981. С. 16–32.

Бульон В.В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Л.: Наука, 1983. 150 с. (Тр. Зоол. ин-та АН СССР; т. 98).

Бульон В.В. Структура и функция микробиальной «петли» в планктоне озерных экосистем // Биология внутр. вод. 2002. № 2. С. 5–14.

Бульон В.В., Никулина В.Н., Павельева Е.Б. и др. Микробиальная «петля» в трофической сети озерного планктона // Журн. общ. биол. 1999. Т. 60, № 4. С. 431–444.

Бушуев В.П., Барабаничиков Е.И. Пресноводные и эстуарные рыбы Приморья. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2012. 314 с.

- Быков В.Д., Васильев А.В. Гидрометрия. 2-е изд. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 501 с.
- Васильев А.В., Шмидт С.В. Водно-технические изыскания. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 368 с.
- Великанов М.А. Гидрология суши. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 403 с.
- Ветрова З.И. Эвгленофитовые водоросли. Флора водорослей континентальных водоемов Украинской ССР. Киев: Наукова думка, 1986. Вып. 1, ч. 1. 348 с.
- Ветрова З.И. Эвгленофитовые водоросли. Флора водорослей континентальных водоемов Украинской ССР. Киев: Наукова думка, 1993. Вып. 1, ч. 2. 260 с.
- Винберг Г.Г. Некоторые общие вопросы продуктивности озер // Зоол. журн. 1936. Т. 15, № 4. С. 587–603.
- Винберг Г.Г. Особенности водных экологических систем // Журн. общ. биол. 1967. Т. 28, № 5. С. 538–545.
- Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР, 1960. 329 с.
- Винберг Г.Г. (ред.). Методы определения продукции водных животных. Минск: Вышэйш. шк., 1968. 246 с.
- Винберг Г.Г. (ред.). Общие основы изучения водных экосистем. Л.: Наука, 1979. 272 с.
- Винников С.Д., Проскуряков Б.В. Гидрофизика. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 312 с.
- Виноградов Ю.Б. Вопросы гидрологии дождевых паводков на малых водосборах Средней Азии и Южного Казахстана // Тр. КазНИГМИ. 1967. Вып. 28. 263 с.
- Виноградова К.Л., Голлербах М.М., Зауер Л.М., Сдобникова Н.В. Зеленые, красные и бурые водоросли. Определитель пресноводных водорослей СССР. Л.: Наука, 1980. Вып. 13. 248 с.
- Виссмен У. (мл.), Харбаф Т.И., Кнэпп Д.У. Введение в гидрологию. М.: Гидрометеиздат, 1979. 470 с.
- Владимиров А.М. Сток рек в маловодный период года. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 295 с.
- Владимиров А.М. Гидрологические расчеты. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 366 с.
- Воскресенский К.П. Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 545 с.
- Вишневкова Т.С. Продольное распределение зообентоса ритрали реки Комаровка (Южное Приморье) // Фауна, систематика и биология пресноводных беспозвоночных. Владивосток: ДВО АН СССР, 1988. С. 76–85.
- Гавриков С.А. Учет влияния местных гидрогеологических условий на сток малых рек при определении его расчетных характеристик (на примере Приморья) // Тр. ДВНИГМИ. 1989. Вып. 142. С. 52–58.
- Гавриков С.А. Районирование сложных по природным условиям территорий для определения коэффициентов асимметрии и автокорреляции характеристик речного стока // Современные проблемы стохастической гидрологии и регулирования стока: тр. Всерос. науч. конф. 10–12 апр. 2012 г., Ин-т вод. проблем РАН, Москва. М.: ИВП РАН, 2012. С. 44–49.
- Гайслер Р. Великие тропические реки // Экологические очерки о природе и человеке. М.: Прогресс. 1988. С. 382–388.
- Ганьшин В.Н. Простейшие измерения на местности. М.: Недра, 1973. 143 с.
- Гаркуша И.Ф., Яцюк М.М. Почвоведение с основами геологии. 2-е изд. М.: Колос, 1975. 368 с.
- Гарцман Б.И., Мезенцева Л.И., Меновицкова Т.С. и др. Условия формирования экстремально высокой водности рек Приморья в осенне-зимний период 2012 года // Метеорология и гидрология. 2014. № 4. С. 77–92.

Гарцман Б.И., Шамов В.В., Губарева Т.С. и др. Речные системы Дальнего Востока России: четверть века исследований. Владивосток: Дальнаука, 2015. 492 с.

Гарцман Б.И., Яковлева Л.М., Рынков В.С. и др. Водохозяйственный комплекс // Долговременная программа охраны природы и рационального использования природных ресурсов Приморского края (Экологическая программа). Часть 1. Владивосток: Дальнаука, 1993. С. 68–142.

Гарцман И.Н. Речная сеть и водоносность территории в условиях юга Дальнего Востока // Тр. ДВНИГМИ. 1968. Вып. 27. С. 15–22.

Гарцман И.Н. Проблема географической зональности и дискретность гидрометеорологических полей в горных условиях муссонного климата // Тр. ДВНИГМИ. 1971. Вып. 35. С. 3–31.

Гарцман И.Н. Топология речных систем и гидрографические индикационные исследования // Вод. ресурсы. 1973. № 3. С. 109–124.

Гарцман И.Н. Топология речных систем и проблемы зональности в географии и гидрологии // Докл. Ин-та географии Сибири и Дальнего Востока. 1974. Вып. 44. С. 33–41.

Гельман Р.Н. Имеет ли перспективы наземная стереофотосъемка // Геодезия и картография. 2011а. № 8. С. 28–29.

Гельман Р.Н. Компьютерный стереокомпаратор как измерительный прибор (по поводу одного спорного вопроса) // Геодезия и картография. 2011б. № 10. С. 61–62.

Герасимов И.П. Структурные черты рельефа СССР и их происхождение // Новые пути в геоморфологии и палеогеографии. М., 1976. С. 213–218.

Геренчук К.И. Тектонические закономерности в орографии и речной сети Русской равнины. Львов: Изд-во Львов. гос. ун-та, 1960. 242 с.

Гидрологический ежегодник, 1960 г. Т. 9, вып. 0–5 / Управление гидрометеорологической службы Дальнего Востока / ред. А.А. Власова. Л.: Гидрометеоиздат, 1963. 387 с.

Глинка Н.Л. Общая химия. 19-е изд. Л.: Химия, 1977. 720 с.

Глобальные цифровые модели рельефа // Геоматика. 2015. № 3. С. 78–82.

Глушков В.Г. Вопросы теории и методы гидрологических исследований. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 416 с.

Голлербах М.М., Косинская Е.К., Полянский В.И. Синезеленые водоросли. Определитель пресноводных водорослей СССР. М.: Сов. наука, 1953. Вып. 2. 652 с.

Голлербах М.М., Полянский В.И. Общая часть. Определитель пресноводных водорослей СССР. М.: Сов. наука, 1951. Вып. 1. 200 с.

Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 374 с.

Горошков И.Ф. Гидрологические расчеты. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 432 с.

Государственный водный кадастр. Разд. 1. Поверхностные воды. Серия 3, Многолетние данные. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Ч. 1. Реки и каналы, ч. 2. Озера и водохранилища. Т. 1. РСФСР. Вып. 19. Бассейны Амура (без Шилки, Аргуни, Уссури, Амазара и Уды) / Дальневосточное территориальное управление по гидрометеорологии и контролю природной среды. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 342 с.

Граменицкая Н.Р. Роль разрывных нарушений при заложении речных долин в Сихотэ-Алинской складчатой области // Вопр. геоморфологии и морфотектоники южной части Дальнего Востока. Владивосток: Дальневост. фил. СО РАН., 1965. С. 84–115.

Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. 2-е изд. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 312 с.

Груза Г.В., Бардин М.Ю., Ранькова Э.Я. и др. Доклад об изменении климата на территории Российской Федерации за 2016 год. М.: Росгидромет, 2017. 70 с.

Дгебуадзе Ю.Ю., Завьялов Н.А., Петросян В.Г. (ред.). Речной бобр (*Castor fiber* L.) как ключевой вид экосистемы малой реки (на примере Приокско-Террасного биосферного заповедника). М.: Т-во науч. изданий КМК, 2012. 150 с.

Дедусенко-Щеголева Н.Т., Голлербах М.М. Желтозеленые водоросли. Определитель пресноводных водорослей СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1962. Вып. 5. 272 с.

Денисов Ю.М. Схема расчета гидрографа стока горных рек. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 103 с.

Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Л.: Наука, 1988. Т. 2, вып. 1. 116 с.

Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). СПб.: Наука, 1992. Т. 2, вып. 2. 125 с.

Дружинин В.С., Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2001. 162 с.

Дрюкер В.В. Методы экологического мониторинга: учебное пособие. Иркутск: ИГУ, 1999. 56 с.

Есин Е.В., Чалов С.Р. Формирование заломов древесной растительности на реках Камчатки и их роль в распределении молоди рыб // Экология. 2011. № 1. С. 49–56.

Есин Е.В., Чебанова В.В., Леман В.Н. Экосистема малой лососевой реки Западной Камчатки (среда обитания, донное население и ихтиофауна). М.: Т-во науч. изданий КМК, 2009. 171 с.

Жадин В.И. Фауна рек и водохранилищ. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1940. 991 с. (Тр. Зоол. ин-та АН СССР; т. 5, вып. 3, 4).

Жадин В.И. Донная фауна Волги от Свияги до Жигулей и ее возможные изменения // Сб. работ по проблеме реконструкции фауны Волги. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1948. С. 413–466. (Тр. Зоол. ин-та АН СССР; т. 8, вып. 3).

Жадин В.И. Методы гидробиологических исследований: Учебное пособие для гос. ун-тов. М.: Высш. шк., 1960. 191 с.

Жадин В.И., Герд С.В. Реки, озера и водохранилища СССР. Их флора и фауна. М.: Учпедгиз, 1961. 599 с.

Жаков Л.А. Формирование и структура рыбного населения озер Северо-Запада СССР. М.: Наука, 1984. 144 с.

Железняков Г.В. Гидрология и гидрометрия. М.: Высш. шк., 1981. 263 с.

Жильцов А.С. Гидрологическая роль горных хвойно-широколиственных лесов Южного Приморья. Владивосток: Дальнаука, 2008. 332 с.

Жуйкова Л.И. О сносимом бентосе в реке Белой (Юго-Восточный Сахалин) // Изв. ТИНРО. 1974. Т. 93. С. 124–128.

Жуков П.И. Справочник по экологии пресноводных рыб. Минск: Наука и техника, 1988. 310 с.

Журавлев Ю.Н., Клышевская С.В. Проблема регулирования уровня воды в бассейне озера Ханка (Приморский край) // Вестн. ДВО РАН. 2015. № 5. С. 40–52.

Журавлева И.В., Ярошенко А.Ю. Периоды повторяемости пожаров в северных лесах мира (карта). М.: Гринпис России, 2014. http://www.forestforum.ru/info/fires/fri_rus.pdf (дата обращения: 20.07.2017).

Забелина М.М., Киселев И.А., Прошкина-Лавренко А.И., Шешукова В.С. Диатомовые водоросли. Определитель пресноводных водорослей СССР. М.: Сов. наука, 1951. Вып. 4. 619 с.

Завьялов Н.А., Крылов А.В., Бобров А.А. и др. Влияние речного бобра на экосистемы малых рек. М.: Наука, 2005. 186 с.

Заика В.Е. Удельная продукция водных беспозвоночных. Киев: Наукова думка, 1972. 144 с.

Зайцев Б.Д. Очерки гидрологических исследований в России. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 325 с.

Замбалева Л.Н. Фитофильные беспозвоночные равнинных рек и водохранилищ. Киев: Наукова думка, 1981. 216 с.

Зенкевич Л.А. (ред.). Жизнь животных. Энциклопедия в шести томах. Т. 4. Ч. 1. Рыбы. М.: Просвещение, 1971. 656 с.

Зернов С.А. Общая гидробиология. М.; Л.: Биомедгиз, 1934. 504 с.

Ивлев В.С. Биологическая продуктивность водоемов // Успехи современ. биологии. 1945. Т. 19, вып. 1. С. 98–120.

Инструкция по фотограмметрическим работам при создании топографических карт и планов. М.: Недра, 1974. 80 с.

Иоффе Ц.И. К методике изучения сноса бентических организмов рекой и его роль в заселении водохранилища // Изв. ВНИИОРХ. 1949. Т. 29. С. 96–105.

Ипатов В.С., Кирикова Л.А. Фитоценология: учебник. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1997. 316 с.

Капица П.Л. Эксперимент, теория, практика. Выступления, статьи. М.: Наука, 1977. 354 с.

Карасев И.Ф., Васильев Б.А., Субботина Е.С. Гидрометрия. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 376 с.

Карасев М.С., Лобанова Н.И. Строение и водоносность речной сети Дальнего Востока. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 135 с.

Карасев М.С., Худяков Г.И. Речные системы на примере Дальнего Востока. М.: Наука, 1984. 144 с.

Караушев А.В. Гидравлика рек и водохранилищ (в задачах). Л.: Гидрометеиздат, 1955. 292 с.

Караушев А.В. Речная гидравлика. Курс общей и специальной гидравлики для гидрологов. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 416 с.

Катанская В.М. Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР. Л.: Наука, 1981. 187 с.

Кафанов А.И. Континуальность и дискретность геоморфологии: биологический и биотический аспекты // Журн. общ. биол. 2005. Т. 66, № 1. С. 28–54.

Киселев И.А. Пирофитовые водоросли. Определитель пресноводных водорослей СССР. М.: Сов. наука, 1954. Вып. 6. 212 с.

Клибашев К.П., Горошков И.Ф. Гидрологические расчеты. 2-е изд. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 460 с.

Клименко Д.Е. Развитие гидрометрических вертушек в России и за рубежом // Географ. вестн. 2010. № 2 (13). С. 12–25.

Ключарева О.А. О скате и суточных вертикальных миграциях донных беспозвоночных Амура // Зоол. журн. 1963. Т. 42, вып. 11. С. 1601–1612.

Кожевникова Н.К., Дюкарев В.Н. Эколого-защитные свойства лесного покрова верхнего пояса гор (Южный Сихотэ-Алинь) // Проблемы региональной экологии. 2011. № 4. С. 31–38.

Колесников Б.П. Чозения *Chosenia macrolepis* (Turcz.) Kom. и ее ценозы на Дальнем Востоке // Тр. ДВФ АН СССР. Серия ботан. 1937. Т. 2. С. 703–800.

Колмакова О.В. Определение видового состава планктонных бактерий бассейна реки Енисей молекулярно-генетическими методами и экспериментальное исследование их биогеохимических функций: дис. ... канд. биол. наук / Сибир. федер. ун-т. Красноярск, 2014. 120 с.

Кондратьев Н.Е. Руслевой процесс. Л.: Гидрометеиздат, 1959. 371 с.

Кондратьева Н.В. Класс Гормогониевые – Hormogoniophyceae. Синезеленые водоросли – Cyanophyta. Определитель пресноводных водорослей Украинской ССР. Киев: Наукова думка, 1968. Вып. 1. 523 с. (На укр. яз.).

Коновалов С.М. Популяционная биология тихоокеанских лососей. М.: Наука, 1980. 237 с.

Константинов А.С. Хириноиды бассейна р. Амур и их роль в питании амурских рыб // Тр. Амурской ихтиологической экспедиции 1945–1949 гг. М.: Изд-во МОИП, 1950. Т. 1. С. 147–286. (Новая серия; отд. зоол. Вып. 16).

Константинов А.С. Биология хирономид и их разведение // Тр. Саратов. Отд. ВНИРО. Саратов, 1958. Т. 5. 1958. 362 с.

Константинов А.С. Сиртон и бентосток Волги близ Саратова в 1966 году // Зоол. журн. 1969. Т. 48, вып. 1. С. 20–29.

Копылов А.И., Косолапов Д.Б. Микробная «петля» в планктонных сообществах морских и пресноводных экосистем. Ижевск: Ин-т биол. внутр. вод РАН, 2011. 330 с.

Коронкевич Н.И. Преобразование водного баланса. М.: Наука, 1973. 102 с.

Коронкевич Н.И. Гидрологическая роль гидрографической сети // Малые реки. М.: Мысль, 1981. С. 85–93.

Косинская Е.К. Десмидиевые водоросли. Конъюгаты, или сцеплянки. Флора споровых растений СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1960. Т. 5, вып. 1. 706 с.

Кочарина С.Л. Особенности микрораспределения и продукция популяций личинок трех видов сетеплетущих ручейников на участке плес–перекат метаритрали р. Кедровая в весенне-летний период // Чтения памяти В.Я. Леванидова. Вып. 1. Владивосток: Дальнаука, 2001. С. 38–54.

Кочарина С.Л., Макаrenchенко Е.А., Макаrenchенко М.А. и др. Донные беспозвоночные в экосистеме лососевой реки юга Дальнего Востока СССР // Фауна, систематика и биология пресноводных беспозвоночных. Владивосток: ДВО АН СССР, 1988. С. 86–108.

Красная книга Мурманской области / Правительство Мурман. обл., Упр. природ. ресурсов и охраны окружающей среды МПР России по Мурман. обл.; науч. ред. Н.А. Константинова и др. Мурманск: Мурман. обл. кн. изд-во, 2003. 400 с.

Крылов А.В., Бобров А.А. (ред.). Экосистема малой реки в изменяющихся условиях среды. М.: Т-во науч. изданий КМК, 2007. 372 с.

Кутикова Л.А., Старобогатов Я.И. (ред.). Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 511 с.

Лабай В.С. Распределение макрозообентоса в нижней ритрали среднеразмерной лососевой реки о. Сахалин // Гидробиол. журн. 2009. Т. 45, № 5. С. 14–30.

Лабай В.С., Живоглядова Л.А., Полтева А.В. и др. Водотоки острова Сахалин: жизнь в текущей воде. Южно-Сахалинск: Сахалин. областной краевед. музей, 2015. 236 с.

Лебедев Ю.М. Балансовый метод в определении первичной продукции в водотоках // Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоемов. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. С. 59–65.

Лебедев Ю.М., Веселкова Т.В., Жуков Э.П. и др. Расчет интенсивности трансформации органического вещества в водотоке с неустановившимся движением воды // Гидробиология бассейна Амура. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1978. С. 3–22.

Леванидов В.Я. Воспроизводство амурских лососей и кормовая база их молоди в притоках Амура // Изв. ТИНРО. 1969. Т. 67. С. 3–243.

Леванидов В.Я. Биомасса и структура донных биоценозов реки Кедровой // Пресноводная фауна заповедника «Кедровая Падь». Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1977. С. 126–158. (Тр. БПИ ДВНЦ АН СССР; т. 45).

Леванидов В.Я., Леванидова И.М. Дрифт водных насекомых в реке Амур // Систематика и экология рыб континентальных водоемов Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1979. С. 3–26.

Леванидов В.Я., Леванидова И.М. Дрифт личинок насекомых в крупной предгорной реке на примере р. Хор (бассейн Усури) // Беспозвоночные животные в экосистемах лососевых рек Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1981. С. 22–37.

Леванидова И.М. Амфибиотические насекомые горных областей Дальнего Востока СССР. Фаунистика, экология, зоогеография Ephemeroptera, Plecoptera и Trichoptera. Л.: Наука, 1982. 215 с.

Леванидова И.М. Горная река Сихотэ-Алиня в свете концепции речного континуума // 5 съезд ВГБО: тез. докл. Тольятти, 1986. Ч. 2. С. 262–264.

Леванидова И.М., Леванидов В.Я. К вопросу о миграциях донных беспозвоночных в толще воды дальневосточных рек // Изв. ТИНРО. 1962. Т. 48. С. 178–189.

Леванидова И.М., Леванидов В.Я. Суточные миграции донных личинок насекомых в речной струе. 1. Миграции личинок поденок в р. Хор // Зоол. журн. 1965. Т. 44, вып. 3. С. 373–389.

Леванидова И.М., Лукьянченко Т.И., Тесленко В.А. и др. Экологические исследования лососевых рек Дальнего Востока СССР // Систематика и экология речных организмов. Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. С. 74–111.

Лелей А.С. (ред.). Определитель насекомых Дальнего Востока России. Т. 6. Двукрылые и блохи. Ч. 4. Владивосток: Дальнаука, 2006. 936 с.

Леман В.Н., Чебанова В.В. Реакция литофильного зообентоса на изменение гранулометрического состава грунта в метаритрале малой предгорной реки (юго-запад Камчатки) // Экология. 2005. № 2. С. 120–125.

Лепнева С.Г. Личинки и куколки подотряда Кольчатощупиковых (Annulipalpia). Ручейники. Т. 2, вып. 1. М.; Л.: Наука, 1964. 562 с. (Фауна СССР: новая серия; № 88).

Лепнева С.Г. Личинки и куколки подотряда Цельнощупиковых (Integripalpia). Ручейники. Т. 2, вып. 2. М.; Л.: Наука, 1966. 560 с. (Фауна СССР: новая серия; № 95).

Лер П.А. (ред.). Определитель насекомых Дальнего Востока СССР. Т. 1. Первично-бескрылые, древнекрылые с неполным превращением. Л.: Наука, 1986. 452 с.

Лер П.А. (ред.). Определитель насекомых Дальнего Востока России. Т. 5. Ручейники и чешуекрылые. Ч. 1. Владивосток: Дальнаука, 1997. 540 с.

Линслей Р.К., Колер М.А., Паулюс Д.Х. Л. Прикладная гидрология. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 760 с.

- Лурье Ю.Ю. Унифицированные методы анализа вод. Изд. 2-е, испр. М.: Химия, 1973. 376 с.
- Лучиева А.А. Практическая гидрометрия. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 381 с.
- Львович М.И. Человек и воды. М.: Географгиз, 1963. 568 с.
- Львович М.И. Мировые водные ресурсы и их будущее. М.: Мысль, 1974. 448 с.
- Макарченко Е.А. Хириноиды советского Дальнего Востока. Подсемейства Podonominae, Diamesinae и Prodiamesinae. Владивосток: Дальнаука, 1985. 200 с.
- Макеева А.П., Павлов Д.С., Павлов Д.А. Атлас молоди пресноводных рыб России. М.: Т-во науч. изданий КМК, 2011. 383 с.
- Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 346 с.
- Маккавеев Н.И., Чалов Р.С. Русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1986. 264 с.
- Маклеллан Р., Айенгард Л., Джэффрис Б. и др. (ред.). Доклад WWF «Живая планета 2014». Виды, территории, люди и места. WWF; ZSL, 2014. 156 с. https://new.wwf.ru/upload/iblock/d14/lpr2014_ru.pdf (дата обращения: 20.07. 2017).
- Мамай И.И. Ландшафтные исследования при изучении стока // Ландшафтный сборник. М.: Изд-во МГУ, 1973. С. 190–207.
- Мандыч А.Ф. Задержание жидких атмосферных осадков сложным растительным покровом // Формирование водного баланса территории. М.: Изд-во АН СССР, 1980. С. 18–30.
- Маргалев Р. Облик биосферы. М.: Наука, 1992. 215 с.
- Матвиенко А.М. Золотистые водоросли. Определитель пресноводных водорослей СССР. М.: Сов. наука, 1954. Вып. 3. 188 с.
- Материалы наблюдений Приморской стоковой станции. Вып. 1. (1940–1960 гг.) / ред. П.А. Урываев / Примор. управление гидрометеорол. службы – Дальневост. науч.-исслед. гидрометеорол. ин-т. Владивосток, 1967. 410 с.
- Мейен С.В. Введение в теорию стратиграфии. М.: Наука, 1989. 216 с.
- Милюков Ф.Н. Природные зоны СССР. М.: Мысль, 1977. 296 с.
- Милюков Ф.Н., Гвоздецкий Н.А. Физическая география СССР. Ч. 1. М.: Высш. шк., 1986. 376 с.
- Мировой водный баланс и водные ресурсы земли. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 640 с.
- Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. Гидрология. 2-е изд. М.: Высш. шк., 2007. 463 с.
- Моисеенко Т.И. Водная экотоксикология. Теоретические и прикладные аспекты. М.: Наука, 2009. 400 с.
- Мошарова И.В., Ильинский В.В., Мошаров С.А. Состояние гетеротрофного бактериопланктона эстуария реки Енисей и зоны Обь-Енисейского речного выноса в осенний период в связи с факторами окружающей среды // Вод. ресурсы. 2016. Т. 43, № 2. С. 202–215.
- Мошкова Н.А., Голлербах М.М. Зеленые водоросли. Класс Улотриксковые. Порядок Улотриксковые. Определитель пресноводных водорослей СССР. М.; Л.: Наука, 1986. Вып. 10, ч. 1. 360 с.
- Мэйтленд П., Линсел К., Сиделева В. Атлас рыб. Определитель пресноводных видов Европы. СПб.: Амфора, 2009. 288 с.
- Назаров А.С. Фотограмметрия (учебное пособие для вузов). Минск: ТетраСистемс, 2006. 368 с.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 2, ч. 2. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 264 с.

Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6, ч. 1. 3-е изд. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 384 с.

Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 26. Приморский край. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 416 с.

Нежиковский Р.А. Русловая сеть бассейна и процесс формирования стока воды. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 446 с.

Нежиковский Р.А. Наводнения на реках и озерах. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 184 с.

Никольский Г.В. Экология рыб: учебное пособие. М.: Высш. шк., 1963. 366 с.

Обзор деятельности Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды за 2009 год. М.: ВНИГМИ-МЦД, 2009. 120 с.

Оньков И.В. Оценка точности высот SRTM для целей ортотрансформирования космических снимков высокого разрешения // Геоматика. 2011. № 3. С. 40–46.

Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП-33-101-2003. М.: Госстрой России, 2004. 73 с.

Определение расчетных гидрологических характеристик. СНиП 2.01.14-83. М.: Госстрой СССР, 1985. 30 с.

Орлова В.В. Гидрометрия. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 416 с.

Павлов Д.С. Биологические основы управления поведением рыб в потоке воды. М.: Наука, 1979. 319 с.

Павлов Д.С., Лупандин А.И., Дегтярева Н.Г., Дедов А.М. Роль турбулентности в формировании распределения покатной молоди рыб (ранних личинок) на широких и узких участках водотока // Докл. РАН. 1995. Т. 341, № 6. С. 842–845.

Павлов Д.С., Лупандин А.И., Костин В.В. Механизмы покатной миграции молоди речных рыб. М.: Наука, 2007. 213 с.

Павлов Д.С., Лупандин А.И., Тарадина Д.Г., Хара Р. Суточная динамика плавучести молоди карповых и окуневых рыб в связи с их покатной миграцией в дельте реки Волги // Вопр. ихтиологии. 1996. Т. 36, № 6. С. 877–850.

Павлов Д.С., Скоробогатов М.А. Миграции рыб в зарегулированных реках. М.: Т-во науч. изданий КМК, 2014. 413 с.

Паламарь-Мордвинцева Г.М. Зеленые водоросли. Класс Конъюгаты. Порядок Десмидиевые (2). Определитель пресноводных водорослей СССР. Л.: Наука, 1982. Вып. 11, ч. 2. 620 с.

Паламарь-Мордвинцева Г.М. Конъюгаты – Conjugatophyceae. Ч. 1. Мезотениевые – Mesotaeniales, гонатозиговые – Gonatozygales, десмидиевые – Desmidiales. Определитель пресноводных водорослей Украинской ССР. М.; Киев: Наукова думка, 1984. Вып. 8. 512 с. (На укр. яз.).

Панкратова В.Я. Личинки и куколки комаров подсемейства Orthoclaadiinae (Diptera, Chironomidae–Tendipedidae). Л.: Наука, 1970. 343 с. (Определители по фауне СССР, издаваемые ЗИН АН СССР; вып. 102).

Панкратова В.Я. Личинки и куколки комаров подсемейства Podonominae и Tanypodinae фауны СССР (Diptera, Chironomidae–Tendipedidae). Л.: Наука, 1977. 154 с. (Определители по фауне СССР, издаваемые ЗИН АН СССР; вып. 112).

Панкратова В.Я. Личинки и куколки комаров подсемейства Chironominae фауны СССР (Diptera, Chironomidae–Tendipedidae). Л.: Наука, 1983. 296 с. (Определители по фауне СССР, издаваемые ЗИН АН СССР; вып. 134).

Попова Т.Г., Сафонова Т.А. Эвгленовые водоросли. Флора споровых растений СССР. Л.: Наука, 1976. Т. 9, вып. 2. 287 с.

Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 448 с.

Правила по технике безопасности при производстве наблюдений и работ на сети Росгидромета. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 317 с.

Природа многолетних колебаний речного стока / ред. И.П. Дружинин. Новосибирск: Наука, 1976. 335 с.

Протасов А.А. Жизнь в гидросфере. Очерки по общей гидробиологии. Киев: Академперіодика, 2011. 704 с.

Пырина И.Д. (отв. ред.). Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоемов. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. 167 с.

Распопов И.М. Высшая водная растительность больших озер Северо-Запада СССР. Л.: Наука, 1985. 200 с.

Решетников Ю.С. (ред.). Атлас пресноводных рыб России. М.: Наука, 2003. Т. 1. 379 с.; Т. 2. 253 с.

Ржаницын Н.А. Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. Л.: Гидрометеоиздат, 1960. 238 с.

Риклефс З. Основы общей экологии. М.: Мир, 1979. 424 с.

Рождественский А.В. Оценка точности кривых распределения гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 271 с.

Рождественский А.В., Ежов А.В., Сахарюк А.В. Оценка точности гидрологических расчетов. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 279 с.

Розенберг В.В., Дюкарев В.Н., Осипов Б.А. Лесной комплекс // Долговременная программа охраны природы и рационального использования природных ресурсов Приморского края до 2005 года (Экологическая программа). Ч. 1. Владивосток: Дальнаука, 1993. С. 143–188.

Рокицкий П.Ф. Биологическая статистика. 3-е изд., испр. Минск: Вышэйш. шк., 1973. 320 с.

Руденко Г.П. Методы определения ихтиомассы, прироста рыб и рыбопродукции // Продукция популяций и сообществ водных организмов и методы ее изучения. Свердловск, 1985. С. 111–138.

Руководство по гидрологической практике. Т. 1, 2. 6-е изд. ВМО-№ 168. 2011–2012. http://www.whycos.org/hwtrp/guide/index_ru.php (дата обращения: 19.07.2017).

Руководство по определению расчетных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 111 с.

Руководство по проверке гидрологических приборов. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. 152 с.

Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Ч. 1 / под ред. Л.В. Боевой. Ростов н/Д: Росгидромет, 2009. 1044 с.

Рундина Л.А. Зигнемовые водоросли России (Chlorophyta: Zygnematales). СПб.: Наука, 1998. 351 с.

Савич И.В., Макаревич Т.А., Остапеня А.П. Динамика дрейфа метафитона // Вестн. БГУ. 2006а. Сер. 2. Вып. 1. С. 60–64.

Савич И.В., Макаревич Т.А., Остапеня А.П. Структура метафитона и его динамика (на примере р. Неман) // Вестн. Мозырского гос. ун-та. 2006б. № 2. С. 50–56.

Салазкин А.А. и др. (сост.). Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах: зообентос и его продукция. Л.: ГосНИОРХ, 1983. 51 с.

Сафонов В.В. Зоопланктон в экосистеме реки Амур // XIV Тихоокеан. науч. конгр. СССР, Хабаровск, август 1979. Комитет Ж. Науки о пресной воде: тез. докл. М., 1979. С. 18–20.

Семенченко В.П. Принципы и системы биоиндикации текучих вод. Минск: Орех, 2004. 125 с.

Сидорчук А.Ю. Структура рельефа речного русла. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 126 с.

Симонов Ю.Г. Региональный геоморфологический анализ. М.: Изд-во МГУ, 1972.

Сиротский С.Е. Первичная продукция и деструкция органического вещества бассейна Нижнего Амура: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Киев, 1991. 26 с.

Соколов А.А., Чеботарев А.И. Очерки развития гидрологии СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 310 с.

Соколовский Д.Л. Речной сток. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 439 с.

Солнцев Н.А. Учение о ландшафте. Избранные труды. М.: Изд-во МГУ, 2001. 384 с.

Сорокин Ю.И. Микропланктон реки Енисея и его роль как фактора самоочищения // Журн. общ. биол. 1987. № 3. С. 350–367.

Соседов И.С. Исследование баланса снеговой влаги на горных склонах. Алма-Ата: Наука, 1967. 196 с.

Соседов И.С. Методика территориальных воднобалансовых обобщений в горах. Алма-Ата: Наука, 1970. 152 с.

Соседов И.С. Исследование гидрологического режима осыпей // Тр. КазНИГМИ. 1973. Вып. 50. С. 3–19.

Спенглер О.А. Послесловие редактора // Бисвас А.К. Человек и вода. Л.: Гидрометеиздат, 1975. С. 252–271.

Справочник по климату СССР. Вып. 26. Приморский край. Метеорологические данные за отдельные годы. Ч. 1. Температура воздуха. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 272 с.

Справочник по климату СССР. Вып. 26. Приморский край. Ч. 4. Влажность воздуха, атмосферные осадки, снежный покров. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 239 с.

Старобогатов Я.И., Прозорова Л.А., Богатов В.В., Саенко Е.М. Моллюски // Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 6. Моллюски, Полихеты, Немертины. СПб.: Наука, 2004. С. 9–491.

Стряпчий В.А. Внутригодовое распределение стока рек бассейна Среднего Амура и некоторые вопросы его классификации. М.: Наука, 1979. 107 с.

Тарадина Т.Г., Павлов Д.С., Лупандин А.И. Связь вертикального распределения молодежи рыб при покатной миграции с их плавучестью и турбулентностью потока // Вопр. ихтиологии. 1997. Т. 37, № 4. С. 532–537.

Тесленко В.А. Обзор фауны веснянок (Plecoptera) и районирование водотоков Дальнего Востока России // Евразият. энтомол. журн. 2007. Т. 6, № 2. С. 157–180.

Тесленко В.А., Холин С.К. Влияние факторов среды на плотность личинок веснянок в метаритрали р. Кедровая (юг Дальнего Востока России) // Чтения памяти В.Я. Леванидова. Вып. 3. Владивосток: Дальнаука, 2005. С. 106–112.

Титов И.А. Взаимодействие растительных сообществ и условий среды. М.: Сов. наука, 1952. 470 с.

Тиунова Т.М. Поденки реки Кедровая и их эколого-физиологические характеристики. Владивосток: Дальнаука, 1993. 196 с.

Тиунова Т.М. Современное состояние и перспективы изучения экосистем лососевых рек юга российского Дальнего Востока // Чтения памяти В.Я. Леванидова. Вып. 1. Владивосток: Дальнаука, 2001. С. 25–30.

Тиунова Т.М. (ред.). Методические рекомендации по сбору и определению зообентоса при гидробиологических исследованиях водотоков Дальнего Востока России. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 95 с.

Тиунова Т.М. Трофическая структура сообществ беспозвоночных в экосистемах лососевых рек юга Дальнего Востока // Экология. 2006. № 5. С. 1–7.

Тиунова Т.М. Динамика биомассы бентоса в экосистемах лососевых рек юга Дальнего Востока // Биологические ресурсы Дальнего Востока России: комплексный региональный проект ДВО РАН. М.: Т-во науч. изданий КМК, 2007а. С. 195–216.

Тиунова Т.М. Современное состояние изученности поденок (Ephemeroptera) Дальнего Востока России и сопредельных территорий // Евразият. энтомол. журн. 2007б. Т. 6, вып. 2. С. 181–194.

Указания по определению расчетных гидрологических характеристик. СН 435-72. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 19 с.

Умнов А.А. Применение статистических методов для оценки параметров эмпирических уравнений, описывающих взаимосвязь между энергетическим обменом и массой тела животного // Журн. общ. биол. 1976. Т. 37. С. 71–86.

Унифицированные методы исследования качества вод. Ч. 1. Методы химического анализа вод. Т. 1. Основные методы. М.: СЭВ, 1987. 1244 с.

Федоровский А.С. Формирование водных ресурсов малых рек юга Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1985. 124 с.

Федоровский А.С. Региональная адаптация моделей круговорота воды: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук / ТИГ ДВО РАН. Владивосток, 1999. 48 с.

Федоровский А.С. Географический и ландшафтный методы в гидрологии // Дальний Восток России: География, гидрометеорология, геоэкология. Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 2007. С. 92–94.

Философов В.П. Методика вычисления и геолого-геоморфологическая интерпретация коэффициента расчлененности рельефа. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1967. 210 с.

Философов В.П. Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1975. 232 с.

Френкель Н.З. Гидравлика. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956. 456 с.

Фролов А.В. (ред.). Второй оценочный доклад Росгидромета об изменении климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: Росгидромет / ЗАО «Группа Море», 2014. 59 с. <http://voeikovmgo.ru/download/2014/od/od2.pdf> (дата обращения 20.07.2017).

Хортон Р.Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. М.: Иностран. лит-ра, 1948. 158 с.

Хромов С.П. Муссоны в общей циркуляции атмосферы // А.И. Войков и современные проблемы климатологии. Л.: Гидрометеиздат, 1956. С. 84–108.

Худяков Г.И. Геоморфотектоника юга Дальнего Востока. Вопросы теории. М.: Наука, 1977. 256 с.

Цветков П.А., Буряк Л.В. Исследования природы пожаров в лесах Сибири // Сибир. лесн. журн. 2014. № 3. С. 25–42.

Цифровые фотограмметрические системы, представленные на российском рынке геоинформатики // Информ. бюл. ГИС-Ассоциации. 2004. № 3 (45); № 4 (46).

Чалов С.Р. Речные наносы в формировании биоценозов лососевых рек // Чтения памяти В.Я. Леванидова. Вып. 5. Владивосток: Дальнаука, 2011. С. 571–579.

Чебанова В.В. Бентос лососевых рек Камчатки. М.: ВНИРО, 2009. 172 с.

Чебанова В.В., Улатов А.В., Леман В.Н. Сравнительная характеристика бентоса, дрифта и обилия молоди лососевых в водотоках различного типа, относящихся к бассейну р. Кихчик (Западная Камчатка) // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана: сб. науч. тр. КамчатНИРО. 2004. Вып. 7. С. 122–130.

Чеботарев А.И. Гидрология суши и расчеты речного стока. 2-е изд. Л.: Гидрометеиздат, 1953. 564 с.

Чеботарев А.И. Общая гидрология (воды суши). Л.: Гидрометеиздат, 1975. 545 с.

Чеботарев А.И. Гидрологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 308 с.

Черешнев И.А. Биологическое разнообразие пресноводной ихтиофауны Северо-Востока России. Владивосток: Дальнаука, 1996. 198 с.

Черешнев И.А. Биогеография пресноводных рыб Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 1998. 131 с.

Черешнев И.А., Шестаков А.В., Скопец М.Б. и др. Пресноводные рыбы Анадырского бассейна. Владивосток: Дальнаука, 2001. 336 с.

Чертопруд М.В. Разнообразие и классификация реофильных сообществ макробентоса средней полосы европейской России // Журн. общ. биол. 2011. Т. 72, № 1. С. 51–73.

Чертосов М.Д. Гидравлика. Специальный курс. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1957. 640 с.

Чугаев Р.Р. Гидравлика. 4-е изд. Л.: Энергоиздат, 1982. 671 с.

Шерстюков Б.Г. Изменения, изменчивость и колебания климата. Обнинск: ВНИГМИ-МЦД, 2011. 293 с.

Шитиков В.К., Зинченко Т.Д., Розенберг Г.С. Макроэкология речных сообществ: концепции, методы, модели. Тольятти: Касандра, 2012. 257 с.

Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.

Штеренлихт Д.В. Гидравлика. М.: Энергоатомиздат, 1984. 640 с.

Шубина В.Н. Дрифт донных беспозвоночных в уральской семужье-нерестовой р. Щугор // Печерский лосось. Сыктывкар: Коми филиал АН СССР, 1979. С. 119–134. (Тр. Коми филиала АН СССР; № 40).

Шубина В.Н. Гидробиология лососевой реки Северного Урала. Л.: Наука, 1986. 158 с.

Шубина В.Н. Бентос лососевых рек Урала и Тимана. СПб.: Наука, 2006. 401 с.

Шустов Ю.А. Дрифт донных беспозвоночных в лососевых реках бассейна Онежского озера // Гидробиол. журн. 1977. Т. 13, № 3. С. 32–37.

Шустов Ю.А. Дрифт беспозвоночных в притоках Онежского озера // Лососевые нерестовые реки Онежского озера. Л.: Наука, 1978. С. 50–53.

Шустов Ю.А., Широков В.А. Методика изучения дрифта беспозвоночных в реках // Гидробиол. журн., 1980. Т. 16, № 3. С. 100–102.

Юрьев Д.Н., Лебедев Ю.М. Развитие ледового перифитона р. Амур в связи со световым фактором // Ботан. журн., 1988. Т. 73, № 11. С. 1546–1551.

Abell R., Thieme M.L., Revenga C. et al. Freshwater ecoregions of the world: a new map of biogeographic units for freshwater biodiversity conservation // *BioScience*. 2008. Vol. 58. P. 403–414.

Alimov A.F. Towards a theory of the functioning of aquatic ecosystems. Leiden: Backhuys Publishers, 2003. 130 p.

Allan J.D. Stream ecology. Structure and function of running waters. 1st ed. L.: Chapman & Hall, 1995. 388 p.

Allan J.D. Stream ecology. Structure and function of running waters. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2006. 388 p.

Allan J.D., Castillo M.M. Stream ecology: structure and function of running waters. 2nd ed. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2007. 428 p.

Allan J.D., Russek E. The Quantification of Stream Drift // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1985. Vol. 42. P. 210–215.

Allen K.R. Distinctive aspects of the ecology of stream fishes: A review // *J. Fish. Res. Board. Can.* 1969. Vol. 26. P. 1429–1438.

Andrews D.A., Minshall G.W. Longitudinal and seasonal distribution of benthic invertebrates in the Little Lost River, Idaho // *Amer. Midland Nat.* 1979. Vol. 102. P. 225–236.

Astakhov M.V., Bogatov V.V. Vertical redistribution of drifting benthic invertebrates in the Kedrovaya River, Primorsky Region of Russia // *Open J. Ecol.* 2014. Vol. 4. P. 53–59.

Azam F., Fenchel T., Field J.G. et al. The ecological role of water-column microbes in the sea // *Marine Ecology Progr. Ser.* 1983. Vol. 10. P. 257–263.

Bailey P.C.E. Diel activity patterns in nymphs of an Australian mayfly *Atalophlebioides* sp. (Ephemeroptera: Leptophlebiidae) // *Austr. J. Marine and Freshwater Res.* 1981. Vol. 32. P. 121–131.

Barbour M.T., Norton S.B., Preston H.B., Thornton K.W. (eds). Ecological assessment of aquatic resources: linking science to decision-making. Pensacola FL, USA: SETAC Press, 2014. 248 p.

Barnes J.R., Minshall G.W. (eds). Stream ecology. Application and testing of general ecological theory. N.Y.; L.: Plenum Press, 1983. 399 p.

Baxter C.V. What is a community? Consequences of reciprocal land-water linkages and organism movement for community theory // *North Amer. Benthol. Soc.*, 54th Annual Meeting. May 25–30, 2008. Salt Lake City, Utah, 2008. www.benthos.org.

Baxter C.V., Fausch K.D., Murakami M., Chapman P.L. Fish invasion restructures stream and forest food webs by interrupting reciprocal prey subsidies // *Ecology*. 2004. Vol. 85. P. 2656–2663.

Baxter C.V., Kennedy T.A., Miller S.W. et al. Macroinvertebrate drift, adult insect emergence and oviposition // *Methods in stream ecology*. Vol. 1. Ecosystems structure / eds F.R. Hauer, G.A. Lamberti. 3rd ed. L.; San Diego: Academic Press/Elsevier, 2017. P. 435–456.

Bayers R.J., Odum H.T. Ecological microcosms. N.Y.; L.: Springer, 1993. 557 p.

Bayly I.A.E., Williams W.D. Inland waters and their ecology. Camberwell: Longman Australia, 1973. 316 p.

Begon M., Harper J.L., Townsend C.R. Ecology: individuals, populations and communities. 3rd ed. Oxford, U.K.: Blackwell Science, 1996. 1068 p.

Benda L., Poff N.L., Miller D. et al. The network dynamics hypothesis: how channel networks structure riverine habitats // *BioScience*. 2004. Vol. 54. P. 413–427.

Benke A.C. Importance of flood regime to invertebrate habitat in an unregulated river-floodplain ecosystem // *J. N. Amer. Benthol. Soc.* 2001. Vol. 20. P. 225–240.

Benke A.C. Secondary production as part of bioenergetic theory-contribution from freshwater benthic science // *River Research and Application*. 2010. Vol. 26, iss. 1. Special Issue. P. 36–44.

Benke A.C., Cushing C.E. (eds). *Rivers of North America*. Burlington, Massachusetts: Academic Press/Elsevier, 2005. 1144 p.

Benke A.C., Cushing C.E. (eds). *Field guide rivers of North America*. San Diego; L.: Elsevier Inc, 2010. 455 p.

Benke A.C., Henry R.L., III, Gillespie D.M., Hunter R.J. Importance of snag habitat for animal production in southeastern streams // *Fisheries*. 1985. Vol. 10. P. 8–13.

Benke A.C., Hunter R.J., Parrish F.K. Invertebrate drift dynamics in a subtropical blackwater river // *J. N. Amer. Benthol. Soc.* 1986. Vol. 5. P. 173–190.

Benke A.C., Wallace J.B. Trophic basis of production among net-spinning caddisflies in a Southern Appalachian stream // *Ecology*. 1980. Vol. 61. P. 108–118.

Biggs B.J.F. Periphyton communities and their environments in New Zealand rivers // *New Zeal. J. of Marine and Freshwater Res.* 1990. Vol. 24. P. 367–386.

Biggs B.J.F. The contribution of flood disturbance, catchment geology and land use to the habitat template of periphyton in stream ecosystems // *Freshwater Biol.* 1995. Vol. 33. P. 419–438.

Bogatov V.V. The structure of a benthic community in the forested river ecosystems. Society for Freshwater Science, All Rights Reserved. Annual meeting. June 4–8, 2017. Raleigh, North, Caroline. http://sfsannualmeeting.org/Schedule/grid_Topics.cfm?dtid=1272,1274,1275,1276,1277,1278&pdtid=1358&rid=487

Bogatov V., Sirotsky S., Yuriev D. The ecosystem of the Amur River // *River and Stream Ecosystems*. Amsterdam: Elsevier, 1995. P. 601–613. (Ecosystems of the World; vol. 22).

Bogatov V.V., Fedorovskiy A.S. Freshwater ecosystems of the southern region of the Russian far east are undergoing extreme environmental change // *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*. 2016. Vol. 417, N 34. P. 1–10.

Bogutskaya N.G., Naseka A.M., Shedko S.V. et al. The fishes of the Amur River: updated check-list and zoogeography // *Ichthyol. Explor. Freshwaters*. 2008. Vol. 19. P. 301–366.

Bone Q., Marshall N.B., Blaxter J.N.S. *Biology of fishes*. 2nd ed. Glasgow: Blackie Academic&Professional, 1995. 332 p.

Bovee K.D. A guide to stream habitat assessment using the instream flow incremental methodology. Instream flow information paper N 12. U.S.D.I. Fish and wildlife service. Fort Collins, 1982. 248 p.

Boyero L., Pearson R.G., Dudgeon D. et al. Global patterns of biodiversity in stream shredder detritivores: implications for ecosystem function in changing climates // *Global Ecology and Biogeography*. 2012. Vol. 21. P. 134–141.

Brakensiek D.L., Osborn H.B., Rawls W.J. Field manual for research in agricultural hydrology. Vol. 224. Washington, DC: USDA, 1979. 547 p.

Brussock P.P., Brown A.V., Dixon J.C. Channel form and stream ecosystem models // *Water Res.* 1985. Vol. 21. P. 859–866.

Bryant M.D. Global climate change and potential effects on Pacific salmonids in freshwater ecosystems of southeast Alaska // *Clim. Change*. 2009. Vol. 95. P. 169–193.

Caspers N., Wagner R. Emergenz-Untersuchungen an einem Mittelgebirgsbach. Bei Bonn. II. Psychoiden-Emergenz 1976/1977 // *Arch. Hydrobiol.* 1980. Bd 88, Heft 1. S. 73–95.

Cassie R.M. Some uses of probability paper in analysis of size frequency distribution // Austr. J. Marine and Freshwater Res. 1954. Vol. 5. P. 513–522.

Cassie R.M. The analysis of polymodal frequency distribution by the probability paper method // N. Z. Sci. Rev. 1950. Vol. 8. P. 89–91.

Cellot B. Rythme nycthemeral et distribution vertical de la derive des microinvertebres benthiques dans une grande riviere europeenne // Arch. Hydrobiol. 1989. Bd 115, Heft 2. S. 265–286.

Cellot B. Influence of side-arms on aquatic macroinvertebrate drift in the main channel of a large river // Freshwater Biol. 1996. Vol. 35. P. 149–164.

Cerrato R.M. Demographic analysis of Bivalve population // Skeletal growth of aquatic organisms. N.Y.; L.: Plenum Press, 1980. P. 417–465.

Chapman D.W. Critical review of variables used to define effects of fines in redds of large salmonids // Trans. Amer. Fish. Soc. 1988. Vol. 117. P. 1–21.

Chase J.M., Amarasekare P., Cottenie K. et al. Competing theories for competitive metacommunities // Metacommunities: Spatial Dynamics and Ecological Communities / eds M. Holyoak, M.A. Leibold, R.D. Holt. Chicago: Univ. Chicago Press, 2005. P. 335–543.

Chekanovskaya O.V. Aquatic oligochaeta of the USSR. Delhi: Amerind Publishing Co. Pvt. Ltd., 1981. 513 p.

Chesson P.L. Environmental variation and the coexistence of species // Community ecology / eds J.M. Diamond, T.J. Case. N.Y.: Harper and Row, 1986. P. 240–256.

Chow V.T. Open-Channel hydraulics. N.Y.: McGraw-Hill, 1959. 680 p.

Chow V.T. Handbook of applied hydrology. N.Y.: McGraw-Hill, 1964. 1495 p.

Chow V.T., Maidment D.R., Mays L.W. Applied Hydrology. N.Y.: McGraw-Hill, 1988. 572 p.

Collen B., Whitton F., Dyer E. et al. Global patterns of freshwater species diversity, threat and endemism // Global Ecology and Biogeography. 2014. Vol. 23. P. 40–51.

Connell J.H. Diversity in tropical rain forests and coral reefs // Science. 1978. Vol. 199. P. 1302–1310.

Crump B.C., Armbrust E.V., Baross J.A. Phylogenetic analysis of particle-attached and free-living bacterial communities in the Columbia River, its estuary, and the adjacent coastal ocean // Appl Environ Microbiol. 1999. Vol. 65. P. 3192–3204.

Crump B.C., Hobbie J.E. Synchrony and seasonality of bacterioplankton communities in two temperate rivers // Limnol. and Oceanogr. 2005. Vol. 50. P. 1718–1729.

Crump B.C., Peterson B.J., Raymond P.A. et al. Circumpolar synchrony in big river bacterioplankton // PNAS. 2009. Vol. 106, N 50. P. 21208–21212.

Cumberlidge N., Ng P.K.L., Yeo D.C.J. et al. Freshwater crabs and the biodiversity crisis: importans, threats, status, and conservation challenges // Biological Conservation. 2009. Vol. 142. P. 1665–1673.

Cummins K.W. Trophic relations of aquatic insects // Ann. Rev. Entomol. 1973. Vol. 18. P. 183–206.

Cummins K.W. Structure and function of stream ecosystems // Bioscience. 1974. Vol. 24. P. 631–641.

Cummins K.W. Riparian-stream linkage paradigm // Verh. Intern. Verein. Limnol. 2002. Vol. 28. P. 49–58.

Cummins K.W., Cushing C.E., Minshall G.W. Introduction: an overview of stream ecosystems // River and stream ecosystems of the world / Eds C.E. Cushing, K.W. Cummins, G.W. Minshall. Berkeley; Los Angeles; L.: Univ. of California Press/Elsevier, 2006. P. 1–8.

Cummins K.W., Klug M.J. Feeding ecology of stream invertebrates // *Ann. Rev. Ecol. Systematics*. 1979. Vol. 10. P. 147–172.

Cummins K.W., Wilzbach M.A., Gates D.M. et al. Shredders and riparian vegetation // *BioScience*. 1989. Vol. 39. P. 24–30.

Cushing C.E., Allan J.D. Streams. Their Ecology and Life. San Diego, CA: Academic Press, 2001. 366 p.

Cushing C.E., Cummins K.W., Minshall G.W. (eds). River and stream ecosystems. Amsterdam; N.Y.: Elsevier, 1995. 817 p. (Ecosystems of the World; vol. 22).

Cushing C.E., Cummins K.W., Minshall G.W. (eds). River and stream ecosystems of the world. Berkeley; Los Angeles; L.: Univ. of California Press/Elsevier, 2006. 817 p.

Cushing C.E., Minshall G.W., Newbold J.D. Transport dynamics of fine particulate organic-matter in 2 Idaho stream // *Limnol. and Oceanogr.* 1993. Vol. 38. P. 1101–1115.

Danehy R.J., Langshaw R.B., Duke S.D., Bilby R.E. Drift distance of macroinvertebrates throughout summer in headwater tributaries of the Calapooia River // *Fundam. Appl. Limnol.* 2011. Vol. 178. P. 111–120.

Darwall W., Smith K., Allen D. et al. (eds). The diversity of life in African freshwaters: underwater, under threat. An analysis of the status and distribution of freshwater species throughout mainland Africa. Cambridge, UK and Gland, Switzerland: IUCN, 2011. 347 p.

Daufresne M., Lengfellner K., Sommer U. Global warming benefits the small in aquatic ecosystems // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 2009. Vol. 106. P. 12788–12793.

Daufresne M., Roger M.C., Capra H., Lamouroux H. Long-term changes within the invertebrate and fish communities of the Upper Rhône River: effects of climatic factors // *Global Change Biol.* 2004. Vol. 10. P. 124–140.

Davies B.R., Walker K.F. The ecology of river systems. Dordrecht, Netherlands: W. Junk Publ., 1986. 793 p.

Davis J.A., Barmuta L.A. An ecology useful classification of mean and near-bed flows in stream and rivers // *Freshwaters Biol.* 1989. Vol. 21. P. 271–282.

Delucchi C.M. Comparison of community structure among streams with different temporal flow regimes // *Can. J. Zool.* 1988. Vol. 66, N 3. P. 579–586.

Dingman S.L. Physical Hydrology. Upper Saddle River: Prentice Hall, Inc., 1994. 545 p.

Dodds W.K. Freshwater ecology. Concepts and environmental application. San Diego, CA: Academic Press/Elsevier, 2002. 569 p.

Dodds W.K. Eutrophication and trophic state in rivers and streams // *Limnol. and Oceanogr.* 2006. P. 671–680.

Dodds W.K., Blair J.M., Henebry G.M. et al. Nitrogen transport from tallgrass prairie watersheds // *J. of Environmental Quality*. 1996. Vol. 25. P. 973–981.

Dodds W.K., Gido K., Whiles M.R. et al. The Stream Biome Gradient Concept: factors controlling lotic systems across broad biogeographic scales // *Freshwater Sci.* 2015. Vol. 34. P. 1–19.

Dodds W.K., Tromboni F., Saltarelli W.A., Cunha D.G.F. The root of the problem: Direct influence of riparian vegetation on estimation of stream ecosystem metabolic rates // *Limnol. and Oceanogr. Lettes.* 2017. Vol. 2. P. 9–17.

Dodds W.K., Whiles M.R. Freshwater ecology. Concepts and environmental applications of limnology. 2nd ed. Amsterdam; L.; N.Y.; San Diego: Academic Press/Elsevier, 2010. 811 p.

Dodson S.I. Introduction to limnology. N.Y.: McGraw-Hill Companies Higher Education, 2005. 400 p.

- Dudgeon D.* Tropical Asian stream: zoobenthos, ecology and conservation. Hong Kong: Hong Kong Univ. Press, 1999. 830 p.
- Dudgeon D.* (ed.). Tropical Stream Ecology. San Diego, CA: Academic Press, 2007. 370 p. (Aquatic Ecology Series).
- Dudgeon D.* (ed.). Tropical Stream Ecology. L.: Academic Press, 2008. 316 p.
- Dudgeon D.* Prospects for sustaining freshwater biodiversity in the 21st century: linking ecosystem structure and function // Current opinion in Environmental Sustainability. 2010. Vol. 2. P. 422–430.
- Elliott J.M.* The life histories and drifting of Trichoptera in a Dartmoor stream // J. of Animal Ecology. 1968. Vol. 37. P. 615–625.
- Elliott J.M.* The distances traveled by drifting invertebrates in a Lake District stream // Oecologia. 1971. Vol. 6. P. 350–379.
- Ensign S.H., Doyle M.D., Gardner J.R.* New strategies for measuring rates of environmental processes in rivers, lakes, and estuaries // Freshwater Sci. 2017. Vol. 36. N 3. P. 453–465.
- Eschmeyer W.N., Fricke R., van der Laan R.* (eds). 2016. Catalog of fishes: genera, species, references. Electronic version accessed dd mmm 2016. <http://researcharchive.calacademy.org/research/ichthyology/catalog/fishcatmain.asp>
- Fenoglio S., Bo T., Gallina G., Cucco M.* Vertical distribution in the water column of drifting stream macroinvertebrates // J. of Freshwater Ecology. 2004. Vol. 19, N 3. P. 485–492.
- Fisher F.* Calamoceratidae, Philorheithridae, Odontoceridae, Leptoceridae. Pars 1. Trichopterorum catalogus 6. Amsterdam: Nederlandsche Entomologische Vereniging, 1965. 242 p.
- Fisher F.* Leptoceridae. Pars 2. Trichopterorum catalogus 7. Amsterdam: Nederlandsche Entomologische Vereniging, 1966. 163 p.
- Galand P.E., Lovejoy C., Pouliot J.* et al. Microbial community diversity and heterotrophic production in a coastal Arctic ecosystem: A Stamukhi lake and its source waters // Limnol. and Oceanogr. 2008. Vol. 53. P. 813–823.
- Georgian T., Newbold J.D., Thomas S.A.* et al. Comparison of corn pollen and natural fine particulate matter transport in streams: can pollen be used as a seston surrogate? // J. N. Amer. Benthol. Soc. 2003. Vol. 22. P. 2–16.
- Gido K.B., Jackson D.A.* (eds). Community ecology of stream fishes: concepts, approaches, and techniques // American fisheries society symposium 73. Bethesda, Maryland: Amer. Fisheries Soc., 2010. 684 p.
- Giller P.S., Malmqvist B.* The biology of streams and rivers. Oxford; N.Y.: Oxford Univ. Press, 1998. 296 p.
- Goedmakers A.* Population dynamics of three gammarid species (Crustacea, Amphipoda) in a Franch chalk stream // Bijdragen tot de Dierkunde. 1980. Vol. 50. P. 1–34.
- Goldman C.R.* (ed.). Primary productivity in aquatic environments. Proc. of an I.B.P. P. Sympos. Pallanza, Italy, April 26 – May 1. 1965. Berkeley, Los Angeles: Univ. of California Press, 1966. 464 p.
- Goldman C.R., Horne A.J.* Limnology. N.Y.: McGraw-Hill, 1983. 464 p.
- Goldman C.R., Kumagai M., Robarts R.D.* (eds). Climatic Change and Global Warming of Inland Waters. Impacts and Mitigation for Ecosystems and Societies. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex (UK): Wiley-Blackwell – A John Wiley & Sons, Ltd, 2013. 496 p.
- Gordon N.D., McMahon T.A., Finlyson B.L.* et al. Stream Hydrology. An introduction for Ecologists. 2nd ed. Chichester: John Wiley&Sons, Ltd, 2004. 429 p.

Gore J.A. Mechanisms of colonization and habitat enhancement for benthic macroinvertebrates in restored rivers channels // The restoration of rivers and streams: theories and experience / ed. J.A. Gore. Boston: Butterworth pub., 1985. P. 81–101.

Gregory S.V., Boyer K.L., Curnell A.M. (eds). The ecology and management of wood in world rivers. Bethesda, Maryland: Amer. Fisheries Soc., 2003. 431 p.

Gregory S.V., Swanson F.J., McKee W.A., Cummins K.W. An ecosystem perspective of riparian zones // BioScience. 1991. Vol. 41. P. 540–551.

Grime J.P. Competitive exclusion in herbaceous vegetation // Nature. 1973. Vol. 242. P. 344–347.

Grizzel R.A. Flood effects on stream ecosystems // J. Soil. and Water Conserv. 1976. Vol. 31. P. 283–285.

Grubbs S.A., Cummins K.W. Linkages between riparian forest composition and shredder voltinism // Arch. Hydrobiol. 1996. Bd 137. P. 39–58.

Gustavsson K., Marvan P., Muller-Haeckel A. Diel drift of diatoms in an equatorial river // Oikos. 1978. Vol. 31. P. 38–40.

Hall R.J., Waters T.F., Cook E.F. The role of drift dispersal in production ecology of a stream mayfly // Ecology. 1980. Vol. 61. P. 37–43.

Hall R.O., Tank J.L., Baker M.A. et al. Metabolism, gas exchange, and carbon spiraling in rivers // Ecosystems. 2016. Vol. 19. P. 73–86.

Hall R.O., Thomas S., Gaiser E. Measuring of freshwater primary production and respiration // Principles and standards for measuring primary production. N.Y.: Oxford Univ. Press, 2007. P. 175–203.

Hamilton K., Bergersen E. Methods to estimate aquatic habitat variables. Denver: Colorado State University, 1984. 372 p.

Harding J.P. The use of probability paper for the graphical analysis of polymodal frequency distribution // J. Mar. Biol. Ass. U.K. 1949. Vol. 28. N 1. P. 141–153.

Harrod C., Graham C., Mallela J. Climate change and the fishes of Britain and Ireland: Briefing Paper 4. Sawston, Cambridge, UK: Fisheries Society of the British Isles, Granta Information Systems, 2007. 42 p. <http://www.fsbi.org.uk/assets/brief-climate-change-norefs.pdf>

Hartley B., Barber H.G., Carter J.R. An atlas of British diatoms. England: Biopress Ltd., 1996. 601 p.

Hauer F.R., Lamberti G.A. (eds). Methods in stream ecology. San Diego, CA: Academic Press/Elsevier, 1996. 674 p.

Hauer F.R., Lamberti G.A. (eds). Methods in stream ecology. 2nd ed. San Diego, CA: Academic Press/Elsevier, 2006. 877 p.

Hauer F.R., Lamberti G.A. (eds). Methods in stream ecology. Vol. 1. Ecosystems structure. 3rd ed. L.; San Diego, CA: Academic Press/Elsevier, 2017. 494 p.

Hauer F.R., Stanford J.A. Ecological responses of hydropsychid caddisflies to stream regulation // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1982. Vol. 39. P. 1235–1242.

Hawkins C.P., Murphy M.L., Anderson N.H. Effects of canopy, substrate composition and gradient on the structure of macroinvertebrate communities in cascade range streams Oregon // Ecology. 1982. Vol. 63. P. 1840–1856.

Heffernan J.B., Soranno P.A., Angilletta M.J. et al. Macrosystems ecology: understanding ecological patterns and processes at continental scales // Frontiers in Ecology and the Environment. 2014. Vol. 12. P. 5–14.

- Henderson F.M.* Open channel flow. N.Y.: Macmillan, 1966. 522 p
- Hildebrand S.G.* The relation of drift to benthos density and food level in an artificial stream // *Limnol. and Oceanogr.* 1974. Vol. 19. P. 951–957.
- Hindák F.* Studies on the Chlorococcal algae (Chlorophyceae). Bratislava: Veda, Publishing house of the Slovak Academy of Sciences, 1980. 195 p.
- Holdridge L.R.* Determination of world plant formations from simple climatic data. American Association for the Advancement of Science // *Science*. 1947. Vol. 105. P. 367–368.
- Hutchinson G.E.* The influence of the environment // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 1964. Vol. 51, N 5. P. 930–934.
- HydroSphere // Environmental monitors. Application and technology news for environmental professionals. 2017, spring. P. 58–59.
- Hynes H.B.N.* The ecology of running waters. Toronto: Univ. of Toronto Press, 1970. 555 p.
- Hynes H.B.N.* The stream and its valley // *Verh. Intern. Verein. Theoretische und Angewandte Limnol.* 1975. Vol. 19. P. 1–15.
- Ice G.G., Neary D.G., Adams P.W.* Effects of wildfire on soils and watershed processes // *J. of Forestry*. 2004. Vol. 102. P. 16–20.
- Illies J.* Die Besiedlung der Fulda (insbes. das Benthos der Salmonidenregion) nach dem jetzigen Stand der Untersuchung // *Berl. Limnol. Flußstat. Freudenthal*. 1953. Bd 5. S. 1–28.
- Illies J.* Annual and seasonal variation of individual weight of adult water insects // *Aquat. Insects*. 1979. N 3. P. 153–163.
- Illies J., Botosaneanu L.* Problems et Methods de la Classification et de la Zonation Ecologique des eaux courantes, considerees surtout du point de vue Faunistique // *Verh. Intern. Verein. Theoretische und Angewandte Limnol.* 1963. Bd 12. S. 1–57.
- Isaak D.J., Luce C.H., Rieman B.E.* et al. Effects of climate change and wildfire on stream temperatures and salmonid thermal habitat in a mountain river network // *Ecol. Appl.* 2010. Vol. 20. P. 1350–1371.
- Jowett I.G., Richardson J.* Effect of a severe flood on instream habitats and trout population in seven New Zealand rivers // *N. Z. J. Marine and Freshwaters Res.* 1989. Vol. 23. P. 11–17.
- Junk W.J., Bayley P.B., Sparks R.E.* The flood pulse concept in river-floodplain systems: Proceedings of the International large river symposium / ed. D.P. Dodge // *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.* 1989. N 106. P. 110–127.
- Kareiva P.M.* Dam choices: analyses for multiple needs // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 2012. Vol. 109. P. 5553–5554.
- Karr J.R., Chu E.W.* Restoring life in running water. Better biological monitoring. Washington; Covello: Island Press, 1999. 207 p.
- Kaushik N.K., Hynes N.B.N.* The fate of autumn-shed leaves that fall into streams // *Arch. Hydrobiol.* 1971. Bd 68. P. 465–515.
- Kemp M.J., Dodds W.K.* Spatial and temporal patterns of nitrogen concentrations in pristine and agriculturally influenced prairie streams // *Biogeochemistry*. 2001. Vol. 53. P. 125–141.
- Kennedy T.A., Muehlbauer J.D., Yackulic C.B.* et al. Flow management for hydropower extirpates aquatic insects, Undermining River food webs // *BioScience*. 2016. Vol. 66, N 7. P. 561–575.
- Kennedy T.A., Yackulic C.B., Cross W.F.* et al. The relation between invertebrate drift and two primary controls, discharge and benthic densities, in a large regulated river // *Freshwater Biol.* 2014. Vol. 59. P. 557–572.

- Knighton D.* Fluvial forms and processes. L.: Edwards Arnold, 1984. 218 p.
- Kolmakova O.V., Gladyshev M.I., Rozanov A.S.* et al. Spatial biodiversity of bacteria along the largest Arctic river determined by next-generation sequencing // FEMS Microbiology Ecology. 2014. Vol. 89. P. 442–450.
- Komárek J., Anagnostidis K.* Cyanoprokaryota. 1. Teil Chroococcales // Süßwasserflora von Mitteleuropa. Jena; Stuttgart; Lübeck; Ulm: Gustav Fischer, 1999. Bd 19/1. 548 p.
- Korte V.L., Blinn D.W.* Diatom colonization on artificial substrata in pool and riffle zones studied by light and scanning electron microscopy // J. Phycol. 1983. Vol. 19. P. 332–341.
- Krammer K.* The genus *Pinnularia* // Diatoms of Europe. Diatoms of the European inland waters and comparable habitats. Germany: A.R.G. Gantner Verlag K.G., 2000. Vol. 1. 703 p.
- Krammer K.* *Cymbella* // Diatoms of Europe. Diatoms of the European inland waters and comparable habitats. Germany: A.R.G. Gantner Verlag K.G. 2002. Vol. 3. 584 p.
- Krammer K., Lange-Bertalot H.* Bacillariophyceae: Naviculaceae // Süßwasserflora von Mitteleuropa. Jena: Gustav Fischer Verlag, 1986. Bd 2, 1. 860 S.
- Krammer K., Lange-Bertalot H.* Bacillariophyceae: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae // Süßwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart; N.Y.: Gustav Fischer Verlag, 1988. Bd 2, 2. 596 S.
- Krammer K., Lange-Bertalot H.* Bacillariophyceae: Achnanthaceae, Kritische Ergänzungen zu *Navicula* (Lineolatae) und *Gomphonema* Gesamtliteraturverzeichnis // Süßwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart; Jena: Gustav Fischer Verlag. 1991a. Bd 2, 4. 437 S.
- Krammer K., Lange-Bertalot H.* Bacillariophyceae: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae // Süßwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart; Jena: Gustav Fischer Verlag, 1991b. Bd 2, 3. 576 S.
- Ladle M., Bass J.A.B.* The ecology of a small chalk stream and its responses to drying during drought conditions // Arch. Hydrobiol. 1981. Bd 90, Heft 44. P. 443–466.
- Lange-Bertalot H., Genkal S.* Diatoms from Siberia I. Islands in the Arctic Ocean (Yugorsky-Shar Strait) // Iconographia diatomologica: annotated diatom micrographs. Germany: A.R.G. Gantner Verlag K.G., 1999. Vol. 6. 304 p.
- Lange-Bertalot H., Metzeltin D.* Indicators of oligotrophy. 800 taxa representative of three ecologically distinct lake types. Carbonate buffered - Oligodystrophic - Weakly buffered soft water // Iconographia diatomologica: annotated diatom micrographs. Germany: A.R.G. Gantner Verlag K.G., 1996. Vol. 2. 390 p.
- Larson D.M., Grudinski B.P., Dodds W.K.* et al. Blazing and grazing: influences of fire and bison on tallgrass prairie stream water quality // Freshwater Sci. 2013. Vol. 32. P. 779–791.
- Lawford R.* Changes in water cycle associated with global change // Water and better human life in the future. Proc. RIHN 1-st Int. Sym., Nov. 6–8, Kioto: RIHN Publ., 2006. P. 17–28.
- Lemke M.J., Michael J., Lemke M.J.* et al. Description of freshwater bacterial assemblages from the Upper Parana River Floodpulse System, Brazil // Microbial Ecology. 2009. Vol. 57. P. 94–103.
- Lenat D.B., Barbour M.T.* Using benthic macro invertebrate community structure for rapid, cost-effective, water quality monitoring: rapid bioassessment // Biological Monitoring of Aquatic Systems / eds S.L. Loeb, A. Spacie. Lonard, FL, USA: Lewis Publishers, Boca Raton, 1994. P. 187–216.
- Leopold L.B., Wolman M.G., Miller J.P.* Fluvial process in geomorphology. San Francisco: W.H. Freeman, 1964. 522 p.

Likens G.E. (ed.) River ecosystem ecology: a global perspective: a derivative of Encyclopedia of inland waters. Amsterdam; San Diego: Elsevier/Academic Press, 2010. 411 p.

Lindeman R. The trophic-dynamic aspect of ecology // Ecology. 1942. Vol. 23, N 4. P. 399–418.

Lotspeich F.B. Watersheds as the basic ecosystem: this conceptual framework provides a basis for a natural classification system // Water Res. Bull. 1980. Vol. 16. P. 581–586.

Maddock I. The importance of physical assessment for evaluation river health // Freshwater Biol. 1999. Vol. 41. P. 373–391.

Madsen B.L. Population dynamics of Brachypteraris nymphs (Plecoptera) // Oikos. 1976. Vol. 27. P. 281–287.

Malmon D.V., Reneau S.L., Katzman D. et al. Suspended sediment transport in an ephemeral stream following wild fire // J. of Geophysical Research: Earth Surface (2003–2012). 2007. Vol. 112. F02006.

Mason J.C., Chapman D.W. Significance of early emergence, environmental rearing capacity, and behavioral ecology of juvenile coho salmon in stream channels // J. Fish. Res. Bd. Can. 1965. Vol. 22. P. 173–190.

Matter W.J., Hopwood A.J. Vertical distribution of invertebrate drift in a large river // Limnol. and Oceanogr. 1980. Vol. 25, N 6. P. 1117–1121.

Maude S.H., Williams D.D. Behavior of crayfish in water current: hydrodynamic pattern in southern Ontario // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1983. Vol. 40. P. 68–77.

McCafferty W.P. Aquatic entomology: the fisherman's and ecologist's guide to insects and their relatives. Boston, MA: Jones & Bartlett Publishers, 1981. 488 p.

McCluney K.E., Poff N.L., Palmer M.A. et al. Riverine macrosystems ecology: sensitivity, resistance, and resilience of whole river basins with human alterations // Frontiers in Ecology and the Environment. 2014. Vol. 12. P. 48–58.

McLay C.L. A theory concerning the distance traveled by animals entering the drift of a stream // J. Fish. Res. Board Can. 1970. Vol. 27. P. 359–370.

Merritt R.W., Cummins K.W. (eds). An introduction to the Aquatic Insects of North America. 3rd ed. Dubuque, Iowa: Kendall/Hunt Publishing Co., 1996. 869 p.

Merritt R.W., Cummins K.W., Berg M.V. Trophic relationships of macroinvertebrates // Methods in stream ecology. Vol. 1. Ecosystems structure / eds F.R. Hauer, G.A. Lamberti. 3rd ed. L.; San Diego: Academic Press/Elsevier, 2017. P. 413–433.

Milhous R.T. Effect of sediment transport and flow regulation on the ecology of gravel-bed rivers / eds R.D. Hey, J.C. Bathurst, C.R. Thorne. Gravel-bed rivers. Chichester: John Wiley, 1982. P. 819–842.

Milhous R.T. Development of a habitat time series // J. Water Res. Plan. and Manag. 1986. Vol. 112. P. 145–148.

Milhous R.T., Updike M.A., Schneider D.M. Physical habitat simulation system reference manual – Version II. Instream Flow Info. Paper N 26. Biol. Report 89 (16). National ecology research center. Washington, DC: U.S. Fish and wildlife service, 1989. 403 p.

Miller M.A., Songer K., Dolen R. Streams: plants, fishes, invertebrates, amphibians, and reptiles. Wisconsin: Univ. of Wisconsin Press, 2014. 312 p.

Minshall G.W. Autotrophy in stream ecosystems // BioScience. 1978. Vol. 28. P. 767–771.

Minshall G.W. Aquatic insect-substratum relationships // The ecology of aquatic insects / eds V.H. Resh, D.M. Rosenberg. N.Y.; Sydney: Praeger Publisher, 1984. P. 358–400.

- Minshall G.W.* Stream ecosystem theory: a global perspective // J. N. Amer. Benthol. Soc. 1988. Vol. 7. P. 263–288.
- Minshall G.W., Cummins K.W., Petersen R.C.* et al. Developments in stream ecosystem theory // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1985. Vol. 42. P. 1045–1055.
- Minshall G.W., Petersen R.W., Cummins K.W.* et al. Interbiome comparison of stream dynamics // Ecol. Monogr. 1983. Vol. 53. P. 1–25.
- Morisava M.E.* Rivers, form and processes. Geomorphology texts. 7. L.: Longman, 1985. 222 p.
- Morris H.M.* Flow in rough conduits // ASCE. 1961. Vol. 120. P. 373–398.
- Morse J.C.* Biodiversity of aquatic insects / eds R.G. Footitt, P.H. Alder. Insect Biodiversity: Science and Society. Oxford. UK: Wiley-Blackwell, 2009. P. 165–184.
- Morse J.C., Bae Y.J., Munkhjargae G.* et al. Freshwater biomonitoring with macroinvertebrates in East Asia // Frontiers in Ecology and Environment. 2007. Vol. 5, N 1. P. 33–42.
- Morse J.C., McCafferty W.P., Stark B.P., Jacobus L.M.* (eds). Larvae of the Southern USA: mayfly, stonefly, and caddisfly species (Ephemeroptera, Plecoltera, and Trichoptera). Clemson: Clemson Univ. Public Service Publishing, 2017. 482 p.
- Moss B.* Ecology of Freshwaters. A view for the twenty-first century. 4th ed. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex (UK): Wiley-Blackwell – A John Wiley & Sons, Ltd, 2010. 433 p.
- Moyle P.B., Cech J.J. (Jr.).* Fishes: An Introduction to Ichthyology. New Jersey: Prentice Hall, Upper Saddle River. 3rd ed. 1996. 559 p.; 4th ed. 2000. 612 p.; 5th ed. 2004. 590 p.
- Muehlbauer J.D., Kennedy T.A., Copp A.J., Sabol T.A.* Deleterious effects of net clogging on the quantification of stream drift // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 2017. Vol. 74. P. 1041–1048.
- Mulholland P.J., Fellows C.S., Tank J.L.* et al. Interbiome comparison of factors controlling stream metabolism // Freshwater Biol. 2001. Vol. 46. P. 1503–1517.
- Müller K.* Investigations on the organic drift in North Swedish streams // Rep. Inst. Freshwater Res. Drottningholm. 1954. Vol. 35. P. 133–148.
- Müller K.* Diurnal rhythm in ‘organic drift’ of *Gammarus pulex* // Nature. 1963. Vol. 198. P. 806–807.
- Müller K.* The colonization cycle of freshwater insects // Oecologia. 1982. Vol. 52. P. 202–207.
- Naiman R.J., Rogers K.H.* Large animals and system level characteristics in river corridors // BioScience. 1997. Vol. 47. P. 521–529.
- Nakano S., Miyasaka H., Kuhara N.* Terrestrial-aquatic linkages: Riparian arthropod inputs alter trophic cascades in a stream food web // Ecology. 1999. Vol. 80. P. 2435–2441.
- Newbold J.D., Elwood J.W., O’Neill R.V., Winkle W.* Nutrient spiraling in stream: The concept and its field measurement // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1981. Vol. 38. P. 860–863.
- Newbold J.D., Mulholland P.J., Elwood J.W., O’Neill R.V.* Organic carbon spiraling in stream ecosystems // Oikos. 1982. Vol. 38. P. 266–272.
- Newbold J.D., O’Neill R.V., Elwood J.W., Winkle W.V.* Nutrient spiraling in stream: implications for nutrient limitation and invertebrate activity // Amer. Nat. 1982. Vol. 120. P. 628–552.
- Nordin C.F. (Jr.).* The sediment loads of rivers // Facets of hydrology / ed. J.C. Rodda. Vol. 2. Chapter 7. Chichester: John Willey, 1985. P. 183–204.
- Odum H.T.* Primary production in flowing waters // Limnol. and Oceanogr. 1956. Vol. 1. P. 102–117.

Odum H.T. Trophic structure and productivity of Silver Springs, Florida // *Ecol. Monogr.* 1957. Vol. 27. P. 55–112.

Oglesby R.T., Carison C.A., McCann J.A. (eds). River ecology and man. Proc. Int. simpos. on River ecology and the impact of man. Univ. of Massachusetts. June 20–23, 1971. N.Y.; San Francisco; L.: Academic Press, 1972. 465 p.

Omernik J.M. Ecoregions of the conterminous United States // *Annals of the Association of American Geographers.* 1987. Vol. 77. P. 118–125.

Orr S., Pittock J., Chapagain A., Dumaresq D. Dams of the Mekong River: Lost fish protein and the implications for land and water resources // *Global Environmental Change.* 2012. Vol. 22, N 4. P. 925–932.

Palmer T.M. The influence of spatial heterogeneity on the behavior and growth of two herbivorous stream insects // *Oecologia.* 1995. Vol. 104. P. 476–486.

Parker G., Klingman P.C., McLean D.G. Badload and size distribution in paved gravel-bed streams // *J. Hyd. Div. Proc. Asce.* 1982. Vol. 108 (HY4). P. 544–571.

Patrick R., Reimer C.W. The diatoms of the United States // *The Academy of Natural Sciences of Philadelphia.* 1966. Vol. 1. 688 p.

Patrick R., Reimer C.W. The diatoms of the United States // *The Academy of Natural Sciences of Philadelphia.* 1975. Vol. 2. 213 p.

Pavlov D.S. The downstream migration of young fishes in rivers: mechanisms and distribution // *Folia zool.* 1994. Vol. 43, N 3. P. 193–208.

Pearson W.D., Kramer R.H. Drift and production of two aquatic insects in a mountain stream // *Ecol. Monogr.* 1972. Vol. 42. P. 365–385.

Pegel M. Zur Methodik der Driftmessung in der Fliessgewässerökologie // *Zeitschrift für Angewandte Entomologie.* 1980. Vol. 89. P. 198–214.

Pennak R.W. Fresh-water invertebrates of the United States. 2nd ed. Toronto: John Wiley & Sons, 1978. 803 p.

Pennington K.L., Cech T.V. Introduction to water resources and environmental issue. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2010. 457 p.

Philipson G.N. The effect of water flow and oxygen concentration of six species of caddisfly (Trichoptera) larvae // *Proc. Zool. Soc. London.* 1954. Vol. 124. P. 547–567.

Pires A.P.F., Marino N.A.C., Srivastava D.S., Farjalla V.F. Predicted rainfall changes disrupt trophic interactions in a tropical aquatic ecosystem // *Ecology.* 2016. Vol. 97, iss. 10. P. 2750–2759.

Pittock J., Dumaresq D., Orr S. The Mekong River: trading off hydropower, fish, and food // *Regional Environmental Change.* 2017. Vol. 17 (in press).

Poff N.L., Allan J.D., Bain M.B. et al. The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration // *BioScience.* 1997. Vol. 47. P. 769–784.

Protasov A., Sulaieva A., Morozovska I., Lopes-Lima M., Sousa R. A massive freshwater mussel bed (Bivalvia: Unionidae) in a small river in Ukraine // *Folia Malacologica.* 2015. Vol. 23, N 4. P. 273–277.

Protasov A.A. Biogeomes of hydrosphere and land as elements of the biosphere structure // *Ecology and noospherology.* 2016. Vol. 27, N 1/2. P. 5–15.

Purcell E.M. Life at low Reynolds number // *Amer. J. Physics.* 1977. Vol. 45. P. 3–11.

Rader R. Streams and the metacommunity concept: New jargon or new insight? // *North Amer. Benthol. Soc. 54th Annual Meeting.* May 25–30, 2008. Salt Lake City, Utah. 2008. www.benthos.org

Rader R.B., Batzer D.P., Wissinger S.A. Bioassessment and management of North American freshwater wetland. N.Y.; Toronto: John Wiley & Sons, INC, 2001. 469 p.

Rader R.B., Voelz N.J., Ward J.V. Post-flood recovery of a macroinvertebrate community in a regulated river: Resilience of an anthropogenically altered ecosystem // *Restoration Ecology*. 2008. Vol. 16. P. 24–33.

Reice S.R., Edwards R.L. The effect of vertebrate predation on lotic macroinvertebrate communities in Quebec, Canada // *Can. J. Zool.* 1986. Vol. 64, N 9. P. 1930–1936.

Reichardt E. Die Diatomeen (Bacillariophyceae) in Ehrenbergs Material von Cayenne, Guyana Gallica (1843) // *Iconographia diatomologica: annotated diatom micrographs*. Germany: A.R.G. Gantner Verlag K.G., 1995. Vol. 1. 100 p.

Report of SCOR-UNESCO working group 17. Determination photosynthetic pigments // *Monographs of oceanographic methodology. Determination of photosynthetic pigments in seawater*. Paris: UNESCO, 1966. P. 9–18.

Resh V.H., Rosenberg D.M. (eds). The ecology of aquatic insects. N.Y.; Sydney: Praeger Publisher, 1984. 625 p.

Rhoades C.C., Entwistle D., Butler D. The influence of wildfire extent and severity on streamwater chemistry, sediment and temperature following the Hayman Fire, Colorado // *Int. J. of Wildland Fire*. 2011. Vol. 20. P. 430–442.

Robertson J.A., Crowe C.T. Engineering fluid mechanics. 2nd ed. Boston: Houghton Mifflin, 1990. 747 p.

Rodrigues E., Morris C.S., Belz J.E. A global assessment of the SRTM performance // *Photogram. Eng. and Remote Sensing*. 2006. Vol. 72. P. 249–260.

Rosenberg D.M., Resh V.H. (eds). Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates. N.Y.; L.: Chapman & Hall, 1993. 488 p.

Ross H.H. The caddis flies or Trichoptera of Illinois // *Bull. Ill. Nat. Hist. Surv.* 1944. Vol. 23. P. 1–326.

Round F.E. 1984. The ecology of algae. N.Y.; Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1984. 664 p.

Sagar P.M. The effects of floods on the invertebrate fauna of a large, unstable braided river // *N. Z. J. Marine and Freshwater Res.* 1986. Vol. 20. P. 37–46.

Sato T., Watanabe K., Kanaiwa M. et al. Nematomorph parasites drive energy flow through a riparian ecosystem // *Ecology*. 2011. Vol. 92. P. 201–207.

Scheidegger A.E. The algebra of stream-order numbers // *U.S.G.S. Prof. paper*. 1965. Vol. 525B. P. 187–189.

Schumm S.A. The fluvial systems. N.Y.: John Wiley, 1977. 335 p.

Sedell J.R., Reeves G.H., Hauer F.R. et al. Role of refugia in recovery from disturbances: modern fragmented and disconnected river systems // *Environmental Management*. 1990. Vol. 14. P. 711–724.

Sekiguchi H., Watanabe M., Nakahara T. et al. Succession of bacterial community structure along the Changjiang River determined by denaturing gradient gel electrophoresis and clone library analysis // *Applied and Environ. Microbiol.* 2002. Vol. 68. P. 5142–5150.

Shannon C.E., Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana, Illinois: Univ. of Illinois Press, 1949. 117 p.

Short R.A., Ward J.V. Macroinvertebrates of a Colorado high mountain stream // *Southwest. Natur.* 1980. Vol. 25. P. 23–32.

- Shreve R.L.* Infinite topology random channel networks // *J. of geol.* 1967. Vol. 75. P. 178–186.
- Simon H.A.* The architecture of complexity // *Proc. Amer. Philos. Soc.* 1962. Vol. 106. P. 467–482.
- Smith D.G.* Effect of vegetation on lateral migration of anatomized channels of a glacier meltwater river // *Bull. Geol. Soc. Amer.* 1976. Vol. 87. P. 857–856.
- Stanford J.A., Lorang M.S., Hauer F.R.* The shifting habitat mosaic of river ecosystems // *Verh. Intern. Verein. Limnol.* 2005. N 29. P. 123–136.
- Statzner B.* Characteristics of lotic ecosystems and consequences for future research direction // *Ecol. Stud.* 1987. Vol. 61. P. 365–390.
- Statzner B., Gore J.A., Resh V.H.* Hydraulic stream ecology: observed patterns and potential applications // *J. N. Amer. Benthol. Soc.* 1988. Vol. 7. P. 307–360.
- Statzner B., Higler B.* Stream hydraulics as a major determinant of benthic invertebrate zonation patterns // *Freshwater Biol.* 1986. Vol. 16. P. 127–139.
- Statzner B., Holm T.F.* Morphological adaptation of shape to flow: microcurrents around lotic macroinvertebrates with known Reynolds number at quasi-natural flow conditions // *Oecologia.* 1989. Vol. 78. P. 145–157.
- Statzner B., Mogel R.* An example showing that drift net catches of stream mayflies (*Baetis* spp. Ephemeroptera, Insecta) do not increase during periods of higher substrate surface densities of the larvae // *Verh. Intern. Verein. Theoretische Angewandte Limnol.* 1985. Vol. 22. P. 3238–3243.
- Stevenson R.J.* Effects of current and conditions simulating autogenically changing microhabitats on benthic diatom immigration // *Ecology.* 1983. Vol. 64. P. 1514–1524.
- Stevenson R.J.* How current on different sides of substrates in streams affect mechanisms of benthic algal accumulation // *Intern. Rev. ges. Hydrobiol.* 1984. Vol. 69. P. 241–262.
- Stevenson R.J.* The stimulation and Drag of Current // *Algal ecology: freshwater benthic ecosystems.* San Diego, California: Acad. Press, An imprint of Elsevier. 1996. P. 321–340.
- Stevenson R.J.* Algae of river ecosystems. In: *River ecosystem ecology: a global perspective.* A derivative of Encyclopedia of inland waters / ed. G.E. Likens. Amsterdam; San Diego: Elsevier/ Academic Press, 2010. P. 89–97.
- Stevenson R.J., Bothwell M.L., Lowe R.L.* (eds). *Algal ecology: freshwater benthic ecosystems.* San Diego: Academic Press, 1996. 753 p.
- Stevenson R.J., Peterson C.G.* Variation in benthic diatom (Bacillariophyceae) immigration with habitat characteristics and cell morphology // *J. Phycol.* 1989. Vol. 25. P. 120–129.
- Strahler A.N.* Dynamic basis of geomorphology // *Bull. Geol. Soc. Amer.* 1952. Vol. 63. P. 923–938.
- Strayer D.L., Dudgeon D.* Freshwater biodiversity conservation: recent progress and future challenges // *J. N. Amer. Benthol. Soc.* 2010. Vol. 29. P. 344–358.
- Streeter V.L., Wylie E.B.* Fluid mechanics. 7th ed. N.Y.: McGraw-Hill, 1979. 740 p.
- Svendsen C.R., Quinn T., Kolbe D.* Review of Macroinvertebrate Drift in Lotic Ecosystems. Final Report. Manuscript. Seattle City Light: Wildlife Research Program. Environmental and Safety Division. 2004. 92 p.
- Tanaka H.* On the daily change of the drifting animals in stream, especially on the types of daily change observed in taxonomic groups of insects // *Bull. Freshwater Fish. Res. Lab.* 1960. Vol. 9. P. 13–24.
- Thorp J.H., Delong M.D.* The riverine productivity model: An heuristic view of carbon sources and organic processing in large river ecosystems // *Oikos.* 1994. Vol. 70. P. 305–308.

Thorp J.H., Delong M.D. Dominance of autochthonous autotrophic carbon in food webs of heterotrophic rivers? // *Oikos*. 2002. Vol. 96. P. 543–550.

Thorp J.H., Thoms M.C., Delong M.D. The riverine ecosystem synthesis: toward conceptual cohesiveness in river science. San Diego, CA: Academic Press/Elsevier, 2008. 208 p.

Tiunova T.M., Teslenko V.A., Kocharina S.L., Medvedeva L.A. Long-term research of small salmon rivers in the Far East of Russia // *Proceeding of the 2nd East Asia-Pacific Regional Conference on Long-Term Ecological Research in the East Asia-Pacific Region: Biodiversity and Conservation of Terrestrial and Freshwater Ecosystems*. Tsukuba, 1998. P. 39–46.

Tockner K., Uehlinger U., Robinson C.T. (Eds). *Rivers of Europe*. L.: Academic Press/Elsevier, 2009. 700 p.

Townsend C.R. The patch dynamics concept of stream community ecology // *J. N. Amer. Benthol. Soc.* 1989. Vol. 8. P. 36–50.

Townsend C.R. Concepts in river ecology: pattern and process in the catchment hierarchy // *Arch. Hydrobiol.* 1996. Suppl. 113. Large Rivers. 10. P. 3–21.

Townsend C.R., Hildrew A.G., Schofield K. Persistence of stream invertebrate communities in relation to environmental // *J. Anim. Ecol.* 1987. Vol. 56. P. 597–613.

Underwood A.J. What is a community? // *Patterns and Process in the History of Life*. Report of the Dahlem Workshop. Berlin, 1986. P. 351–367.

Vannote R.L., Minshall G.W., Cummins K.W. et al. The River Continuum Concept // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1980. Vol. 37. P. 130–137.

Vannote R.L., Sweeney B.W. Geographic analysis of thermal equilibria: a conceptual model for evaluating the effect of natural and modified thermal regimes on aquatic insect communities // *Amer. Nat.* 1980. Vol. 115. P. 667–695.

Vernet M., Smith R.C. Measuring and modeling primary production in marine pelagic ecosystems Principles and standards for measuring primary production. N.Y.: Oxford Univ. Press. 2007. P. 142–174.

Vogel S. Life in moving fluids, the physics biology of flow. New Jersey: Princeton Univ. Press, 1981. 352 p.

Vorosmarty C.J., McIntyre P.B., Gessner M.O. et al. Global threats to human water security and river biodiversity // *Nature*. 2010. Vol. 467. P. 555–561.

Voshell Jt.J.R. A guide to common freshwater Invertebrates of North America. Blackburg, Virginia: McDonald and Woodward Publishing Co, 2002.

Wallace J.B., Hutchens J.J., Grubaugh J.W. Transport and Storage of FROM. Methods in stream ecology. San Diego, CA: Academic Press/Elsevier, 2006. P. 249–271.

Ward J.V., Stanford J.A. The serial discontinuity concept of lotic ecosystems // *Dynamics of lotic ecosystems* / eds T.D. Fontaine, S.M. Bartel. Ann Arbor, MI: Ann Arbor Science Publ., 1983. P. 29–42.

Waters T.F. Standing crop and drift of stream bottom organisms // *Ecology*. 1961. Vol. 42. P. 532–537.

Waters T.F. Diurnal periodicity in the drift of stream invertebrates // *Ecology*. 1962. Vol. 43. P. 316–320.

Waters T.F. Interpretation of invertebrate drift in stream // *Ecology*. 1965. Vol. 46. P. 327–334.

Waters T.F. Production rate, population density, and drift of a stream invertebrate // *Ecology*. 1966. Vol. 47. P. 595–604.

Waters T.F. The drift of stream insects // *Ann. Rev. Entomol.* 1972. Vol. 17. P. 253–272.

- Waters T.F.* Secondary production in inland waters // *Advances in Ecological Research*. 1977. Vol. 10. P. 91–64.
- Webb P.W.* Form and function in fish swimming // *Scientific Amer.* 1984. Vol. 251. P. 58–68.
- Webster J.R., Benfield E.F.* Vascular plant breakdown in freshwater ecosystems // *Ann. Rev. Ecol. System.* 1986. Vol. 17. P. 567–594.
- Webster J.R., Patten B.C.* Effects of watershed perturbation on stream potassium and calcium dynamics // *Ecol. Monogr.* 1979. Vol. 49. P. 57–72.
- Weisse T.* The microbial loop and its sensitivity to eutrophication and contaminant enrichment: a cross-system overview // *Intern. Rev. ges. Hydrobiol.* 1991. Vol. 76. P. 327–337.
- Weisse T.* Pelagic microbes – Protozoa and the microbial food web // *The lakes handbook*. Vol. 1. Limnology and limnetic ecology. Malden; Oxford: Blackwell Publishing, 2003. P. 417–460.
- Wetmore S.H., Mackay R.J., Newbury R.W.* Characterization of the hydraulic habitat of *Brachycentrus occidentalis*, a filter feeding caddisfly // *J. No. Am. Benth. Soc.* 1990. Vol. 9. P. 157–169.
- Wetzel R.G.* Limnology. Lake and river ecosystems. 3rd ed. San Diego, CA: Academic Press, 2001. 1006 p.
- Wetzel R.G.* (ed.). Periphyton of freshwater ecosystems. The Hague, Netherlands: Dr. W. Junk Publishers, 1983. 346 p.
- Wetzel R.G., Likens G.E.* Limnological analyses. 2nd ed. N.Y.: Springer-Verlag, 1991. 391 p.; 3rd ed. 2000. 425 p.
- White F.M.* Fluid mechanics. 4th ed. N.Y.: McGraw-Hill College Div., 1999. 826 p.
- Whittier T.R., Hughes R.M., Larsen D.P.* The correspondence between ecoregions and spatial patterns in stream ecosystems in Oregon // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1988. Vol. 45. P. 1264–1278.
- Wildish D., Kristmanson D.* Benthic suspension feeders and flow. Cambridge Univ. Press, 1997. 409 p.
- Williams D.D., Moore K.A.* The role of semiochemicals in benthic community relationships of lotic amphipod *Gammarus pseudolimnaeus*: a laboratory analysis // *Oikos*. 1985. Vol. 44. P. 280–286.
- Wilzbach M.A., Cummins K.W., Knapp R.* Toward a functional classification of stream invertebrate drift // *Verh. Intern. Verein. Limnol.* 1988. Vol. 23. P. 1244–1254.
- Woodward G., Perkins D.M., Brown L.E.* Climate change and freshwater ecosystems: Impacts across multiple levels of organization // *Philos. Trans. R. Soc. B. Biol. Sci.* 2010. Vol. 365 (1549). P. 2093–2106.
- Yalin M.S., Karahan E.* Inception of sediment transport // *J. Hyd. Div.* 1979. Vol. 105. P. 1433–1443.
- Ziv G., Baran E., Nam S.* et al. Trading-off fish biodiversity, food security, and hydropower in the Mekong River Basin // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 2012. Vol. 109. P. 5609–5614.

Научное издание

*Виктор Всеволодович Богатов
Александр Сергеевич Федоровский*

ОСНОВЫ РЕЧНОЙ ГИДРОЛОГИИ И ГИДРОБИОЛОГИИ

Редактор *Л.А. Русова*
Компьютерная верстка *С.В. Филатов*

Подписано к печати 10.10.2017.
Печать офсетная. Бумага офсетная. Формат 70х100/16.
Усл. п. л. 31,2. Уч.-изд. л. 29,6. Тираж 300 экз. Заказ 0757

ФГУП «Издательство Дальнаука»
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7
Тел. 8 (423) 231-21-05. E-mail: dalnauka@mail.ru
<http://www.dalnauka.ru>

Отпечатано в ЗАО «ЛИТ»
690078, г. Владивосток, ул. Комсомольская, 1в.