

Характеристика водосбора: текущие дескрипторы, пробелы в знаниях и будущие возможности

Лариса Тарасова а б, Себастьян Гнанны с d, Сухён Ян е ф g, Андреас Хартманн ч, Торстен Вагнер р с

Larisa Tarasova a b, Sebastian Gnann c d, Soohyun Yang e f g, Andreas Hartmann h, Thorsten Wagener c

a

Отдел гидрологии водосбора, Центр экологических исследований имени Гельмгольца – UFZ, Галле (Заале), Германия

b

Кафедра инженерии Земли и окружающей среды, Колумбийский университет в городе Нью-Йорк, Нью-Йорк, США

c

Институт экологических наук и географии Потсдамского университета, Потсдам, Германия

d

Кафедра гидрологии, факультет окружающей среды и природных ресурсов, Фрайбургский университет, Фрайбург, Германия

e

Отдел анализа и управления водными экосистемами, Центр экологических исследований имени Гельмгольца – UFZ, Магдебург, Германия

f

Центр понимания передовых систем (CASUS), Гёрлиц, Германия

g

Кафедра гражданской и экологической инженерии, Сеульский национальный университет, Сеул, Южная Корея

h

Институт управления подземными водами, Дрезденский технический университет, Дрезден, Германия

Цитировать

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104739> [Получить права и контент](#)

Под лицензией Creative Commons [лицензия](#) открытый доступ

Абстрактный

Способность характеризовать гидрологически значимые различия между местами лежит в основе нашей науки. Обычный способ количественной характеристики гидрологических водосборов — это использование дескрипторов, которые обобщают соответствующие физические аспекты системы, как правило, путем агрегирования разнородной геопространственной информации в одно число. Такие дескрипторы охватывают различные аспекты функционирования и структуры водосбора, выявляют сходство или различие между водосборами и переносят гидрологическую информацию в ненаблюдаемые места. Однако до сих пор нет единого мнения о том, как следует выбирать, агрегировать и оценивать дескрипторы водосборов. Хуже того, мало что известно о существовании потенциальных предубеждений в современных методах характеристики водосборов. В этом систематическом обзоре мы анализируем 742 научные статьи, опубликованные в период с 1967 по 2021 год, чтобы предоставить категоризированный обзор современных и исторических методов характеристики водосборов (т. е. источников данных, методов агрегации и оценки) в гидрологической науке и смежных дисциплинах. Мы раскрываем существование существенных смещений в характеристике водосбора: (1) только 16% проанализированных исследований относятся к засушливым средам, хотя такие среды охватывают 42% поверхности суши в мире, что говорит о том, что большинство дескрипторов водосбора адаптированы для представления сред с ограниченной энергией и потенциально менее эффективны в средах с ограниченной водой; (2) только 30% исследований используют подповерхностные характеристики для характеристики водосбора, несмотря на доминирование подповерхностного потока; (3) только 4% и 9% дескрипторов агрегированы пространственно и вертикально дифференцированно соответственно, в то время как большинство дескрипторов являются простыми средними и не учитывают гидрологически значимые изменчивости характеристик в пределах водосборов; (4) 25% всех проанализированных исследований не оценивают полезность дескрипторов водосбора, и ни одно из них не количественно определяет их неопределенность. Мы демонстрируем потенциальное влияние этих смещений на нашу способность эффективно характеризовать водосборы и определять функциональное сходство поведения водосбора с помощью иллюстративных примеров. Наконец, мы предлагаем возможные способы получения более надежных, всеобъемлющих и гидрологически значимых описаний водосборов.

- [Предыдущая статья в выпуске](#)
- [Следующая статья в выпуске](#)

Ключевые слова

Регулярный обзор

Дескрипторы водосбора, атрибуты водосбора

Характеристики водосбора

Пространственная агрегация

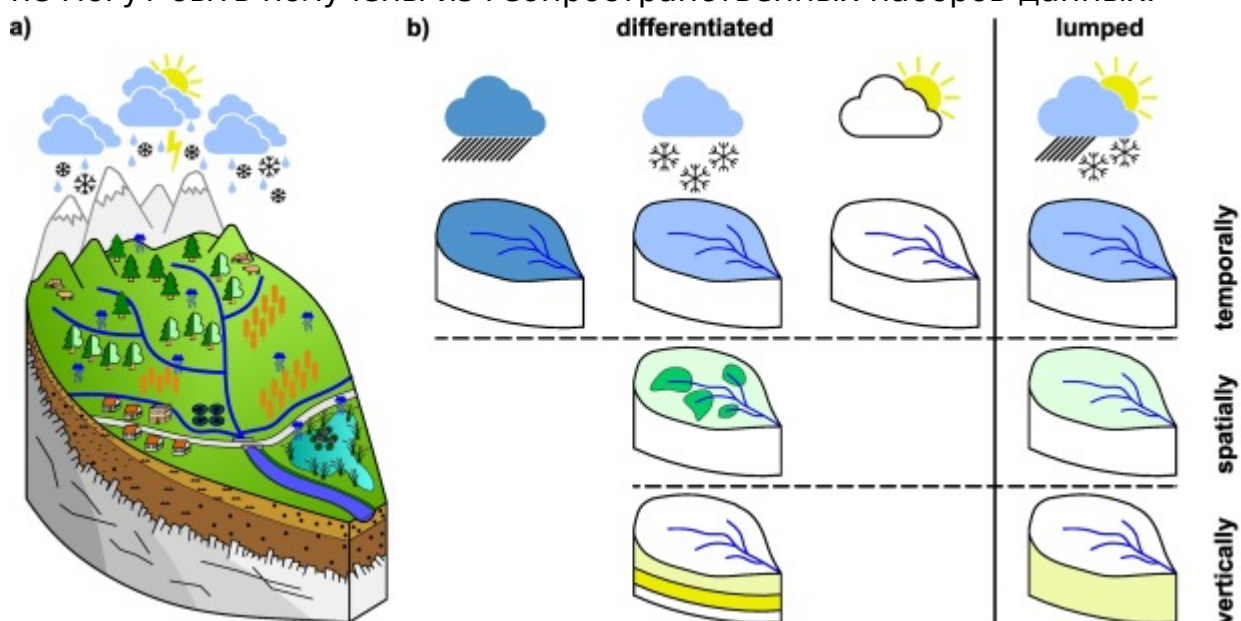
Подземная структура

Функционирование водосбора

1. Введение

Дескрипторы водосбора являются широко используемыми метриками в науках о Земле и окружающей среде для описания различных функциональных и структурных аспектов гидрологических водосборов.

Первое определение дескрипторов водосбора было дано [Хортоном \(1932\)](#), который определил их как «гидрологические факторы, которые особенно связаны с условиями, зависящими от работы гидрологического цикла, в частности, от стока и грунтовых вод, и могут быть широко классифицированы как морфологические, почвенные факторы, геолого-структурные факторы, растительные и климатические факторы». В этом обзоре мы используем несколько более широкое определение дескрипторов водосбора как любой характеристики, которая описывает контрольный объем, заключенный в гидрологически эффективной границе водосбора ([Liu et al., 2020](#)) от верхней границы атмосферы через поверхность Земли до нижней границы активной циркуляции потока ([Condon et al., 2020](#)), которая (потенциально) связана с работой гидрологического цикла ([рис. 1 а](#)). Следует отметить, что мы не включаем никакие переменные, полученные из гидрологических потоков или состояний (например, индекс базисного стока), которые на самом деле часто рассматриваются как гидрологические сигнатуры поведения водосбора ([McMillan, 2020](#)). Мы делаем это, потому что они требуют гидрологических измерений (например, речной сток, поток грунтовых вод, состояние влажности почвы) и в отличие от дескрипторов водосбора не могут быть получены из геопространственных наборов данных.



1. [Загрузить: Загрузить изображение в высоком разрешении \(480 КБ\)](#)
2. [Скачать : Загрузить полноразмерное изображение](#)

Рис. 1. **а**) Элементы наземного гидрологического цикла с водосбором в качестве единицы управления (т.е. единицы агрегации); **б**) методы агрегации: временно-, пространственно- и вертикально-сосредоточенные или дифференцированные подходы.

Дескрипторы водосбора дают полезную информацию о сходстве структуры водосбора и широко используются для классификации водосборов в однородные группы ([Sawicz et al., 2011](#) ; [Merz et al., 2020b](#)). Соответственно, они часто играют важную роль в передаче информации о

том, как функционируют водосборы, т. е. как они разделяют, хранят и выпускают воду ([Wagener et al., 2007](#)) из измеряемых в неизмеряемые места ([Blöschl et al., 2013](#) ; [Hrachowitz et al., 2013](#)). Что наиболее важно, дескрипторы водосбора играют ключевую роль в обобщении и переносимости локальных результатов в другие места и в более крупные пространственные масштабы, и они облегчают поиск гидрологических закономерностей (т. е. моделей, объясняющих изменчивость реакции водосбора). Однако регулярно возникают опасения, что структурное сходство водосборов, описываемое современными дескрипторами, не обязательно означает сходство гидрологического поведения ([Удин и др., 2010](#) ; [Тарасова и др., 2018](#)).

Дескрипторы водосбора обычно получаются путем агрегирования геопро пространственных наборов данных, таких как цифровые модели рельефа или карты землепользования, в скалярное значение ([рис. 1 б](#)). Однако в научном сообществе не существует никаких руководящих принципов, а следовательно, и согласия относительно того, как следует выбирать, агрегировать или оценивать дескрипторы ([Аддор и др., 2020](#)). Возможность описывать гидрологически значимые различия между местами становится решающей в свете формирующейся области крупномасштабной гидрологии, которая опирается на разработку согласованных наборов данных дескрипторов водосбора для конкретных стран и регионов. Например, наборы данных Catchment Attributes and Meteorology for Large Sample Studies (CAMELS) (например, США ([Addor et al., 2017](#)), Великобритания ([Coxon et al., 2020](#)), Бразилия ([Chagas et al., 2020](#)), Чили ([Alvarez-Garretton et al., 2018](#)), Австралия ([Fowler et al., 2021](#)), Центральная Европа ([Klingler et al., 2021](#)), Швейцария ([Höge et al., 2023](#)), Китай ([Hao et al., 2021](#)) и другие) обобщают соответствующую геопро пространственную информацию из местных, национальных и глобальных источников и стали широко использоваться, тем самым подкрепляя многие выводы недавних гидрологических исследований. На сегодняшний день был только один обзор частоты выбора дескрипторов водосбора, проведенный [Ssegane et al. \(2012a\)](#) на основе 42 несистематически отобранных статей, которые предоставили довольно ограниченное представление об этом вопросе. Кроме того, [Benson et al. \(1973\)](#) и [Kiang et al. \(2013\)](#) представили резюме исследований регионализации на основе регрессии из отчетов Геологической службы США (USGS). Они обнаружили, что площадь водосбора почти всегда включается в качестве объясняющей переменной независимо от целевой оценки на основе стока (например, среднегодовой сток, квантили паводка, квантили низкого стока). Они также указывают, что средняя высота, уклон, осадки, лес, вода и непроницаемый покров, а также проницаемость почвы часто используются в уравнениях регрессии регионализации по статистике стока. Вместо этого другие характеристики почвы, землепользования и геологические показатели используются в отчетах Геологической службы США реже, хотя

региональным органам водного хозяйства рекомендуется добавлять такую информацию, когда это возможно ([Farmer et al., 2021](#)). Сравнение большой выборки исследований регионализации показало, что методы, основанные на пространственной близости, по-прежнему часто превосходят методы, основанные на гидрологическом сходстве (т. е. дескрипторы водосбора, [Parajka et al., 2013](#)), что указывает на то, что климатические факторы оказывают значительное влияние на сходство и различие гидрологической функции водосбора. Однако это контрастирует с данными полевых и экспериментальных исследований, которые часто предполагают критическую роль подповерхностной структуры водосбора (например, [Tromp-Van Meerveld и McDonnell, 2006](#) ; [Pfister et al., 2017](#)). Низкая точность глобальных моделей поверхности суши и крупномасштабных гидрологических моделей при моделировании изменчивости гидрологических реакций еще больше добавляет веса гипотезе о том, что значимость климатических факторов для гидрологических реакций может сильно модулироваться поверхностью суши и недрами, которые эти модели по-прежнему не способны точно представлять ([Or, 2020](#) ; [Gnann et al., 2023](#)). Расхождение между результатами экспериментальных и сравнительных (большая выборка или регионализация) исследований свидетельствует о том, что существует значительный потенциал для улучшения того, как мы характеризуем водосборы и определяем их сходство. Что еще более проблематично, мало что известно о существовании потенциальных предубеждений, неопределенностей и наследий в характеристике водосборов в различных исследовательских дисциплинах, связанных с гидрологией, и о том, как они влияют на наше понимание гидрологического сходства, синтеза процессов критической зоны и, в конечном счете, на разработку новой гидрологической теории. Поэтому главная цель этого систематического обзора — выявить текущие практики, предубеждения и ограничения в характеристике водосборов, особенно в отношении источников данных и методов, которые используются для вывода и агрегации дескрипторов. В частности, мы рассматриваем следующие исследовательские вопросы:

- А. Каковы наиболее популярные источники данных для получения дескрипторов водосборов и существуют ли различия в их использовании в разных географических регионах и областях исследований?
- Б. Каким образом дескрипторы водосбора агрегируются в масштабе водосбора и какие аспекты внутренней изменчивости учитываются?
- С. Каким образом, если это вообще возможно, количественно и качественно определяется и оценивается полезность и неопределенность различных описаний водосбора?

Мы иллюстрируем потенциальное влияние ошибок, выявленных в систематическом обзоре ([Раздел 3](#)), на отдельных примерах ([Раздел 4](#)) и далее предлагаем возможные пути продвижения к более надежным и полным описаниям водосборов ([Раздел 5](#)).

2. Методы

2.1 Отбор научных статей

Мы попытались извлечь наиболее полную выборку исследовательских статей, включающих анализы дескрипторов водосборов водных объектов для различных приложений в науках о Земле, окружающей среде и гидрологии.

Для достижения этой цели мы следовали текущим рекомендациям PRISMA для систематических обзоров ([Page et al., 2021](#)) и извлекли все журнальные статьи, написанные на английском языке, проиндексированные в Scopus, в результате объединения поисковых слов « *catchment* » (или альтернативных терминов, таких как « *watershed* », « *drission basin* » и « *river basin* ») и « *descriptor* » (или альтернативных терминов, таких как « *character* », « *attribute* », « *indicator* » и « *property* ») в названии, аннотации или ключевых словах. Обратите внимание, что поиск проводился в единственном числе (т. е. « *descriptor* » вместо « *descriptors* »), чтобы автоматически учесть оба случая. Поиск термина « *property* » проводился для термина « *property* », чтобы учесть различия в написании между формами единственного и множественного числа. Рассматривались только случаи, когда термин « *catchment* » или его эквиваленты, упомянутые выше, предшествовали термину « *descriptor* » и его эквивалентам (т. е. мы использовали оператор PRE/1 для проведения поиска). Первоначальный поиск дал 2659 статей (таблица S1). Поиск был выполнен в октябре 2021 года.

В случаях, когда идентификатор DOI отсутствовал, статьи с любой важной информацией, отсутствующей (например, имя автора или название статьи или и то, и другое), которая мешала нам найти полный текст статьи, были исключены. На следующем этапе мы исключили все повторения, отбросив все статьи с одинаковыми названиями. Мы также отфильтровали все статьи, которые не были связаны с водосборами какой-либо гидрологической системы (например, реки, ручья, озера или водохранилища). Поскольку нашей главной целью является исследование практик сравнительного анализа, мы выбрали только исследовательские статьи, которые исследуют как минимум два водосбора и не только упоминают характеристику водосбора, но и фактически выполняют формальный анализ (количественный или качественный) дескрипторов водосбора. В результате этого выбора было опубликовано 742 статьи в период с 1967 по 2021 год (таблица S1).

2.2 Создание метаданных для финальной выборки статей

Для каждой статьи мы извлекли следующую информацию: год публикации, журнал, страна исследования, количество

проанализированных водосборов и проанализированных дескрипторов водосборов (таблица S2).

Все статьи были классифицированы в соответствии с **типом исследования** (например, анализ на основе данных, гидрологическое моделирование, статистическое или машинное моделирование и полевые исследования) и по **типу применения** (например, описательное сравнение участков, кластеризация/классификация водосбора, количественная идентификация контроля и регионализация) в соответствующей **области исследований** (например, качество воды, количество воды, перенос отложений, трассеры, исследование озер, водные экосистемы) (рис. S1). Мы также записали метод, **используемый в каждом исследовании для оценки «полезности» дескрипторов** для соответствующей цели исследования, например, объяснительной силы (например, бикорреляция), соответствия (например, множественной регрессии), предсказательного потенциала (например, производительности моделей, основанных на дескрипторах водосбора для тестовых/валидационных образцов), сходства классификации (например, сходства членства в кластере на основе исследованных дескрипторов водосбора и проверенных с использованием гидрологических переменных/сигнатур) или значимости в различиях между полученными группами водосборов.

2.3 Подробный анализ отдельных источников данных и дескрипторов водосбора

Мы организовали все описания водосборов в соответствии со следующими **исходными источниками данных**, из которых они обычно получены (таблица S2):

- 1. гидрометеорологические временные ряды
- 2. цифровые модели рельефа и топографические карты
- 3. карты растительности и землепользования, полученные с помощью дистанционного зондирования
- 4. карты антропогенного присутствия (например, карты населения и инфраструктуры)
- 5. производные гидрогеологические карты (например, карты типов водоносных горизонтов или соответствующей гидравлической проводимости, полученные из литостратиграфических карт с использованием предположений о свойствах проницаемости/консолидации различных литостратиграфических единиц)
- 6. литологические и литостратиграфические карты
- 7.

карты глубины почвы и карты текстуры почвы (включая гидравлические свойства почвы, которые могут быть получены из текстуры почвы, например, с использованием функций педопереноса, таких как насыщенная проводимость, полевая емкость и т. д.).

- 8.

карты типов почв

Дескрипторы водосбора, полученные с использованием комбинации двух или более различных источников данных (например, индекс топографии почвы), были собраны в отдельную составную группу (таблица S2, *Композит*) и проанализированы отдельно (см. [раздел 3.2](#)).

Для каждого отдельного дескриптора, организованного в соответствии с основными источниками данных, мы определили **тип**

переменной (например, бинарный, непрерывный, дискретный, номинальный, порядковый) и **типичные показатели**

агрегации (например, среднее/медианное, мода, диапазон, коэффициент вариации, асимметрия, стандартное отклонение, часть водосбора, охваченная дескриптором и т. д.). На основе этой информации мы различали, используют ли исследования **пространственно-,**

вертикально- и временно-дифференцированные или

сосредоточенные подходы к агрегации ([рис. 1 б](#)). Мы рассматриваем

любую переменную, которая агрегируется таким образом, что включает или представляет собой меру расстояния в пространстве, фиксирует пространственную изменчивость в пространстве или представляет класс или категорию, которая подразумевает пространственное расстояние или пространственное распределение, как пространственно-

дифференцированную переменную. Например, среднее значение высоты, усредненное для всего водосбора, является примером пространственно-концентрируемой агрегации, в то время как коэффициент вариации высоты в пределах водосбора является примером пространственно-дифференцированной агрегации. Аналогично, мы рассматриваем любую

переменную, агрегированную для охвата временной изменчивости, сезонности, продолжительности, времени или частоты возникновения явлений, как временно-дифференцированную переменную. Например, среднегодовое количество осадков является примером временно-

объединенной агрегации, в то время как сезонность осадков рассматривается как временно-дифференцированная агрегация. Мы

рассматриваем любую переменную, которая агрегирована для представления вертикальной подповерхностной и поверхностной изменчивости или которая представляет класс или категорию,

подразумевающую вертикальное расстояние или вертикальное распределение, как вертикально-дифференцированную переменную.

Например, среднее содержание глины во всем столбе почвы можно

рассматривать как вертикально-объединенную агрегацию, в то время как среднее содержание глины в верхнем слое почвы или в подпочве можно рассматривать как вертикально-дифференцированную агрегацию.

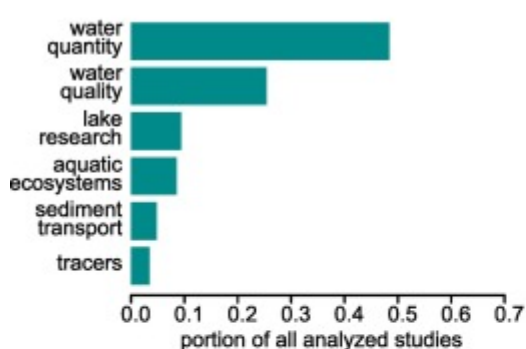
3. Результаты

3.1 . Резюме полученной выборки статей

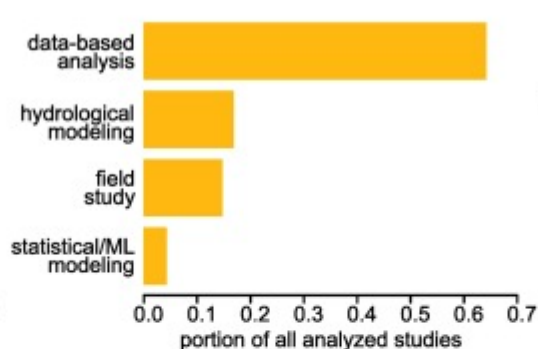
В полученной выборке статей >50% проанализированных исследований посвящены различным аспектам количества воды (например, гидрологическим сигнатурам, характеристикам паводков) ([рис. 2а](#)) .

Около 25% всех статей посвящены качеству воды (например, концентрации различных химических соединений, взаимосвязи концентрации и расхода). Остальные 25% исследований посвящены водным экосистемам (например, разнообразию видов, распространенности различных признаков), исследованию озер, переносу осадков и трассерам (например, среднему времени транзита, возрасту воды) ([рис. 2а](#)).

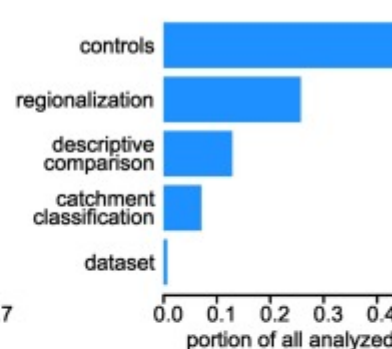
a) Research field



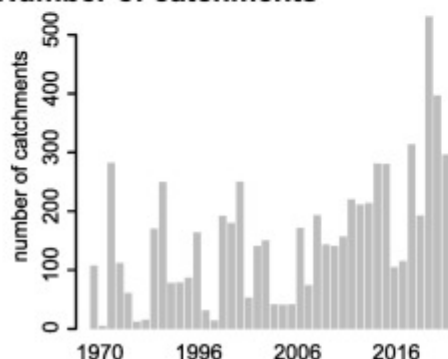
b) Type of study



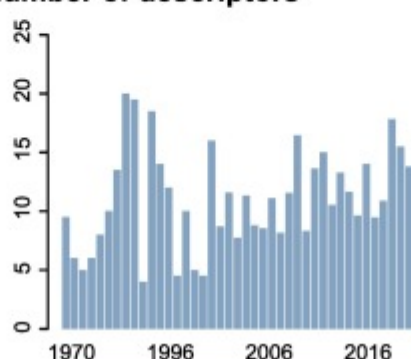
c) Type of application



d) Number of catchments



e) Number of descriptors



1. [Загрузить](#) : Загрузить изображение в высоком разрешении (473 КБ)
2. [Скачать](#) : Загрузить полноразмерное изображение

Рис. 2. Тематическое резюме проанализированных статей по **а)** различным областям исследований, **б)** типу исследований и **в)** типам приложений; **г)** временное распределение среднего числа водосборов, проанализированных в проанализированных статьях за год; **д)** временное распределение среднего числа дескрипторов водосборов, проанализированных в проанализированных статьях. Большинство рассмотренных исследований выполняют анализ на основе данных (т. е. исследуют эмпирические зависимости и отношения между дескрипторами водосбора и целевыми переменными). Только 5% всех исследований сосредоточены на статистическом моделировании (например, моделировании кривых частоты наводнений) или

моделировании речного стока с использованием подходов машинного обучения ([рис. 2 б](#)). Около 15% всех исследований сосредоточены на гидрологическом моделировании. Остальные 15% статей представляют собой полевые исследования, которые активно получают новые измерения целевых переменных.

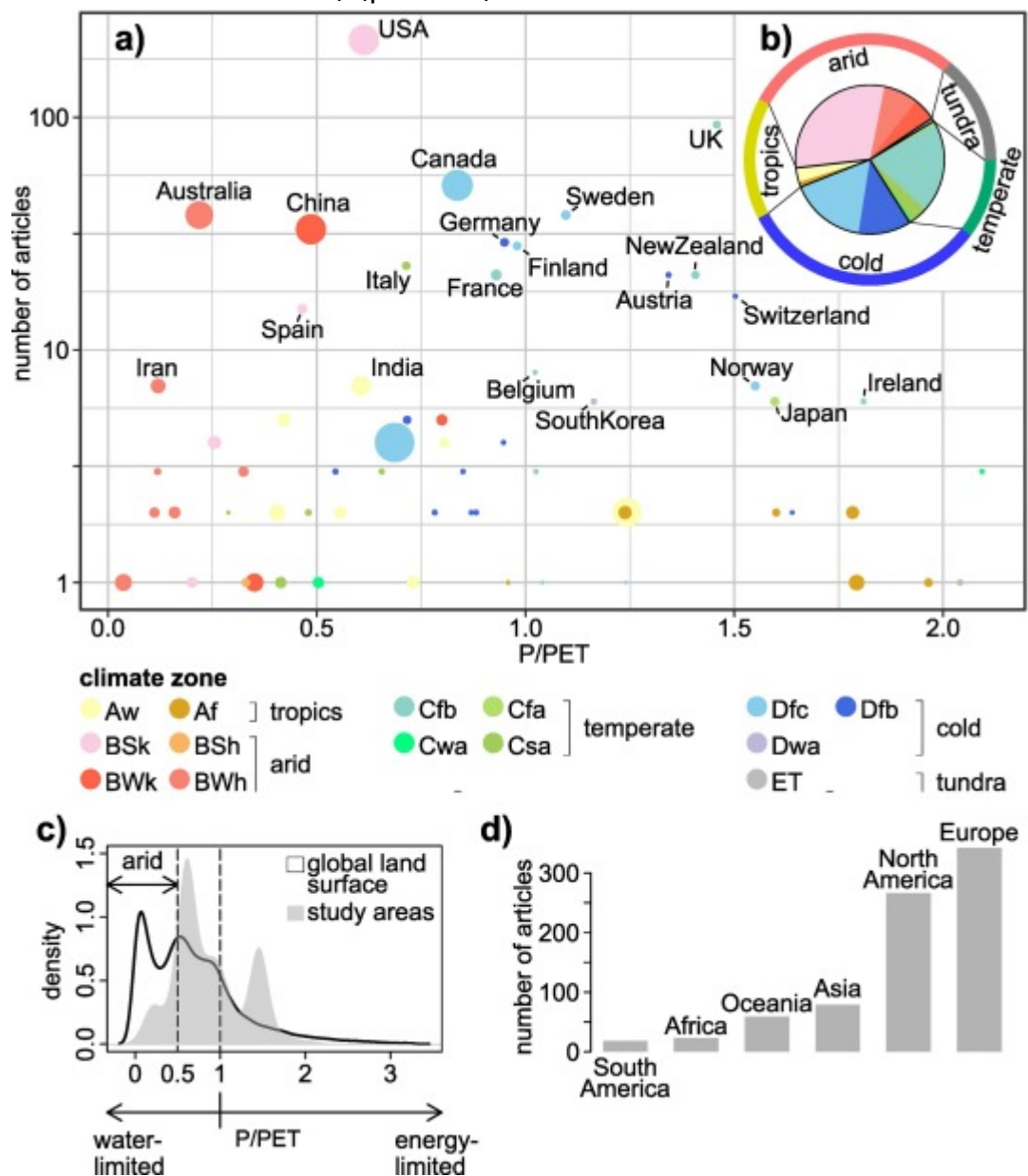
Более половины всех исследований пытаются определить доминирующие элементы управления для целевой переменной среди рассматриваемых дескрипторов водосбора, и почти 30% исследований используют дескрипторы водосбора для целей регионализации. Около 15% всех исследований используют дескрипторы водосбора для описательного (т.е. качественного) сравнения между водосборами ([рис. 2 с](#)).

3.2 . Резюме переменных, полученных из отдельных источников данных

Среди свойств поверхности дескрипторы, извлеченные из цифровых моделей рельефа и гидрометеорологических наборов данных, в основном являются непрерывными переменными, в то время как дескрипторы растительности и землепользования в основном являются номинальными (рис. S2a). Дескрипторы, извлеченные из цифровых моделей рельефа, обычно извлекаются без какой-либо агрегации (т. е. скалярные значения, такие как площадь водосбора или местоположение центроида) или как среднее значение (например, средняя высота или средний уклон) и часть водосбора, охваченная (например, часть водосбора, охваченная определенными формами рельефа, такими как днища долин или склоны холмов). Подавляющее большинство дескрипторов из гидрометеорологических наборов данных агрегируются как средние значения (рис. S2b). Дескрипторы растительного покрова и землепользования в основном агрегируются как часть водосбора или часть прибрежной зоны, охваченная определенным классом (например, сельское хозяйство или лес) (рис. S2b). Вместо этого дескрипторы антропогенной деятельности весьма разнообразны и извлекаются одинаково часто как номинальные, непрерывные или дискретные переменные (рис. S2) и соответственно агрегируются как доля водосборов, охватываемых определенной категорией (например, различные типы дорог), средние значения и суммы (например, плотность скота).

Среди свойств грунта, помимо карт глубины и текстуры грунта, преобладают номинальные переменные ([рис. 3 а](#)). Для производных гидрогеологических карт также распространена порядковая информация (например, упорядоченные категории гидравлической проводимости грунта). Соответственно, свойства грунта, полученные из гидрогеологических, литостратиграфических и карт типов грунта, обычно агрегируются как доля водосбора, охваченная соответствующей номинальной или порядковой категорией, или даже просто как бинарное присутствие или отсутствие данной категории (рис. S3b). Карты глубины и текстуры грунта, которые обычно включают гидравлические свойства

грунта (проводимость, полевая емкость, доступное содержание воды), одинаково часто предоставляют непрерывную и номинальную информацию (например, объемное содержание глины, пористость, глубина до коренной породы) и соответственно агрегируются как пространственные средние значения или части водосбора, охваченные определенной категорией (например, часть водосбора, охваченная песчаными почвами) (рис. S3).



1. [Загрузить: Загрузить изображение в высоком разрешении \(584 КБ\)](#)
2. [Скачать : Загрузить полноразмерное изображение](#)

Рис. 3. Расхождение между областями исследования статей по характеристике водосбора и распределению поверхностей суши в мире. **a)** Количество исследований по дескрипторам водосбора среди сред с ограниченной энергией и ограниченной водой (определяется средним индексом влажности, который представляет собой отношение осадков (P) и потенциального испарения (PET), значения меньше единицы

соответствуют средам с ограниченной водой, где потенциальное испарение превышает осадки, тогда как значения выше единицы соответствуют средам с ограниченной энергией, где испарение ограничивается не доступностью воды, а энергией) страны, где расположена область исследования, из [Zomer et al. \(2022\)](#)). Ось Y представлена в логарифмическом масштабе. Размер точек пропорционален размеру соответствующих стран. Цветовая кодировка точек соответствует климатической зоне, доминирующей в соответствующей стране (обратите внимание на значительную внутреннюю изменчивость климатических условий, особенно в крупных странах, например, Австралии, Канаде, Китае, США) в соответствии с классификацией Кеппен-Гейгера из [Beck et al. \(2018\)](#) (Af: Тропический дождевой лес; Aw: Тропическая саванна; BSh: Засушливая степь жаркая; BSk: Засушливая степь холодная; BWh: Засушливая пустыня жаркая; BWk: Засушливая пустыня холодная; Cfa: Умеренный без сухого сезона жаркое лето; Cfb: Умеренный без сухого сезона теплое лето; Csa: Умеренный сухой жаркий лето; Cwa: Умеренный сухая зима жаркое лето; Dfb: Холодный без сухого сезона теплое лето; Dfc: Холодный без сухого сезона холодное лето; Dwa: Холодная сухая зима жаркое лето; ET: Тундра). **б)** Доля статей, отнесенных к различным климатическим зонам (внутренний круг), и доля этих климатических зон в глобальной площади поверхности суши (внешний круг). **в)** Распределение индекса влажности исследуемых территорий в проанализированных статьях и распределение индекса влажности глобальной поверхности суши на основе набора данных [Zomer et al. \(2022\)](#) . Значения индекса влажности выше 1 соответствуют регионам с ограниченной энергией, а значения ниже 1 соответствуют регионам с ограниченной водой. Значения индекса влажности ниже 0,5 соответствуют сухим полусухим, засушливым и гиперзасушливым средам. **д)** Распределение статей по шести континентам.

Мы нашли несколько примеров составных дескрипторов водосборов, которые получены путем объединения различных источников данных. Однако, похоже, что такие дескрипторы используются только по отдельности, за исключением индекса топографии почвы (комбинация гидравлической проводимости почвы и индекса топографической влажности, [Walter et al., 2002](#)) и номера кривой Службы охраны почв, который объединяет информацию о типе почвы, землепользовании и поверхностном покрове водосборов ([Mishra and Singh, 2003](#) ; см. Таблицу S2, *Композит*). Стоит отметить, что в абсолютных величинах даже индекс топографии почвы и номер кривой используются очень редко по сравнению с некомпозитными дескрипторами.

3.3 Выявленные отклонения в текущей практике характеристики водосбора

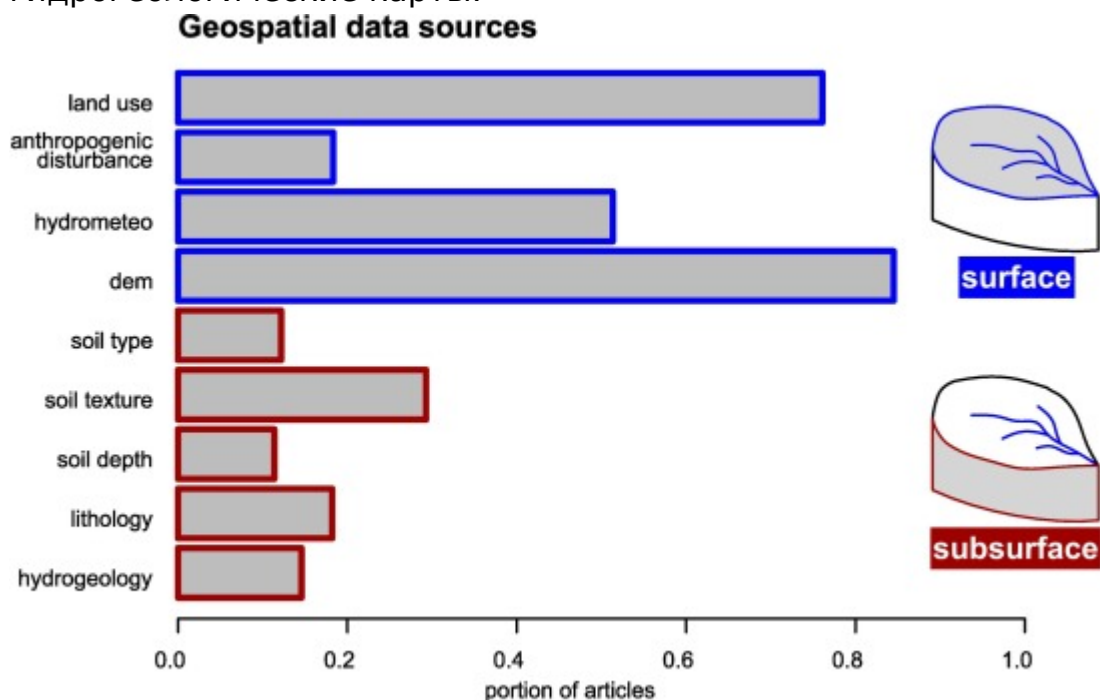
3.3.1 Ошибка 1 : Сухие среды представлены недостаточно.

Мы обнаружили большие различия в количестве исследований, анализирующих дескрипторы водосборов, которые опубликованы в разных странах (т. е. в соответствии с местоположением исследуемой области, [рис. 3](#)), с большим количеством исследований на Глобальном Севере (т. е. в Европе, Северной Америке, Океании) по сравнению с Глобальным Югом ([рис. 3 d](#)). Мы извлекли индекс влажности (т. е. соотношение осадков и потенциального испарения) для каждой страны, используя набор данных [Zomer et al. \(2022\)](#) , доминирующую климатическую зону, используя набор данных [Beck et al. \(2018\)](#) , и валовой внутренний продукт в 2019 году в качестве показателя социально-экономического развития. Наш анализ показывает явные диспропорции в фокусе областей исследования анализируемых статей и глобальной поверхности суши ([рис. 3 b, c](#)). Хотя умеренный климат составляет в глобальном масштабе только около 10% поверхности суши ([Beck et al., 2018](#)), почти 25% областей исследования связаны с этими регионами. Напротив, <5% всех статей посвящены тропическим районам, несмотря на их глобальную долю в 16% ([рис. 3 б](#)). Расхождения еще более выражены с точки зрения представления влажных и сухих сред. Исследования по характеристике водосбора на сегодняшний день непропорционально сосредоточены на влажных средах (средах с ограниченной энергией, т. е. индекс влажности > 1), несмотря на их маргинальную долю в глобальном покрове поверхности суши ([рис. 3 в](#)). Вместо этого, даже если 42% глобальной площади поверхности суши соответствуют полузасушливым, засушливым и гиперзасушливым условиям (индекс влажности $< 0,5$, т. е. потенциальное испарение вдвое превышает количество осадков; [Зомер и др., 2022](#)), только 16% всех исследований посвящены таким сухим средам ([рис. 3 в](#)). Существует тесная связь между количеством статей по характеристике водосбора и валовым внутренним продуктом ([рис. S4](#)). Это указывает на то, что наблюдаемое расхождение может быть обусловлено ограниченными инвестициями в мониторинг и исследования на глобальном Юге, что приводит к более редким сетям наблюдений в более сухих и теплых условиях ([Cho et al., 2017](#) ; [Krabbenhoft et al., 2022](#)). Помимо этого, существуют существенные различия в антропогенном использовании поверхностных вод во влажных и сухих условиях (например, навигация, промышленный и питьевой забор воды, рыболовство, рекреация и т. д.), которые могли привести к появлению обширных сетей мониторинга постоянных водотоков в более влажных условиях для поддержки надежного управления водными ресурсами для разных пользователей. Более того, в более сухих условиях непостоянные водотоки встречаются чаще, но попытки их измерения по-прежнему

скудны ([Messenger et al., 2021](#)), что, возможно, усиливает наблюдаемую непропорциональность исследований характеристик водосбора. Независимо от сложности социально-экономических факторов, упомянутых выше, которые привели к расхождениям между плотностью сетей наблюдений во влажных и сухих средах, эти расхождения, вероятно, создадут смещение в нашем восприятии важности различных дескрипторов водосбора для фиксации функциональности гидрологических систем. Поскольку исследования в сухих средах недостаточно представлены в нашем анализе, трудно судить, являются ли текущие дескрипторы такими же полезными в таких регионах. Это, возможно, уже способствовало более низкой точности прогнозирования методов регионализации, основанных на физическом сходстве (т. е. методов, которые используют дескрипторы водосбора как меру сходства между измеренными и неизмеренными водосборами) в сухих средах ([Parajka et al., 2013](#) ; [Salinas et al., 2013](#) ; [Blöschl et al., 2013](#)).

3.3.2 Ошибка 2: Подземные свойства представлены недостаточно

Наш систематический обзор показывает большую диспропорциональность в использовании различных источников данных/наборов данных для получения дескрипторов водосбора ([рис. 4](#)). Наборы данных, описывающие свойства поверхности, такие как цифровые модели рельефа, гидрометеорологические наборы данных, карты землепользования или земельного покрова, используются гораздо чаще, чем источники данных, описывающие свойства подповерхности, такие как карты типа почвы, текстуры или глубины, литологические и гидрогеологические карты.



1. [Загрузить](#) : Загрузить изображение в высоком разрешении (262 КБ)
2. [Скачать](#) : Загрузить полноразмерное изображение

Рис. 4. Часть статей, включающих дескрипторы (по крайней мере один) из разных источников данных, которые представляют свойства поверхности (синий контур): цифровые модели рельефа или топографические карты (*dem*), гидрометеорологические ряды (*hydrometeo*), карты антропогенного нарушения и землепользования; и свойства подповерхности (темно-красный контур): гидрогеологические карты, литологические карты, карты глубины почвы, карты текстуры почвы и карты типов почвы. (Для интерпретации ссылок на цвет в этой легенде рисунка читатель отсылается к веб-версии этой статьи.)

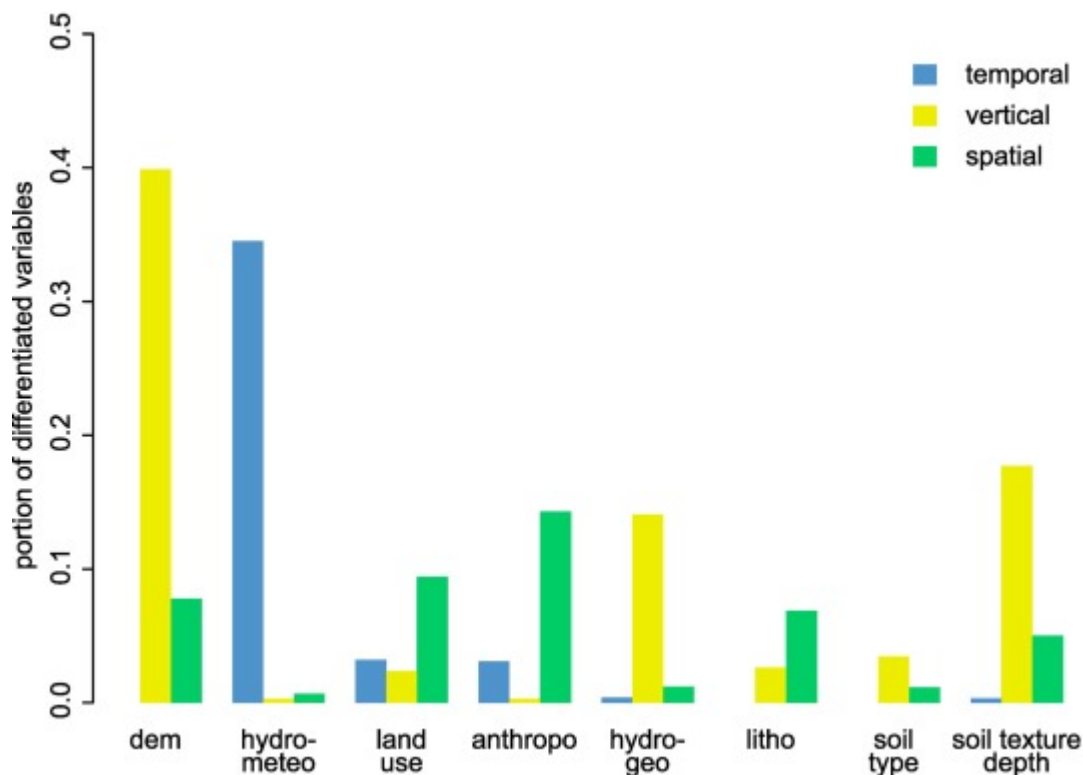
Наиболее частыми источниками данных являются цифровые модели рельефа (около 85% всех исследований получают по крайней мере один дескриптор водосбора из этого источника), что неудивительно, поскольку цифровые модели рельефа с высоким пространственным разрешением (по сравнению с другими источниками данных) в настоящее время доступны во всем мире (например, 90 м из миссии SRTM, 30 м из ASTER GDEM), а данные LIDAR с еще более высоким разрешением (<10 м) становятся все более доступными локально ([Hawker et al., 2018](#)). Однако даже до эпохи глобальных высококачественных наборов данных (т. е. начала 2000-х годов) соответствующие дескрипторы широко использовались (рис. S5). Карты землепользования, растительного покрова и растительности также относятся к одному из самых популярных источников, причем почти 80% всех проанализированных исследований получают по крайней мере один дескриптор из этих источников. Аналогично цифровым моделям рельефа, доступно несколько глобальных и региональных продуктов землепользования и растительного покрова с высоким разрешением (например, GLC2000, EarthStat, CORINE). Около 50% всех исследований использовали по крайней мере один дескриптор, полученный из гидрометеорологических наборов данных, таких как осадки, температура, временные ряды испарения или растры ([рис. 4](#)). Менее интенсивное использование гидрометеорологических переменных по сравнению со свойствами землепользования может быть связано с тем, что для получения соответствующих долгосрочных свойств требуется по крайней мере несколько лет наблюдений. В отличие от других поверхностных дескрипторов, антропогенные нарушения используются только в 20% всех исследований ([рис. 4](#)). Они стали более распространенными в последние годы (рис. S5), вероятно, в связи с растущей доступностью соответствующих источников данных и осознанием важности деятельности человека для функционирования водосбора в научном сообществе ([Wagener et al., 2010](#) ; [Sivapalan et al., 2012](#)).

Источники данных, содержащие информацию о подповерхностных свойствах водосборов, гораздо менее многочисленны по сравнению с источниками поверхностных свойств ([рис. 4](#)). Также интересно отметить, что существуют небольшие различия в практиках различных областей исследований, типов исследований и приложений (рис. S8-S10), что

указывает на постоянную недопредставленность подповерхностных свойств в исследованиях характеристик водосборов. Карты текстуры почвы (которые также включают производные гидравлические свойства почвы) являются наиболее часто используемым источником данных среди подповерхностных свойств (почти 30% всех исследований). Несмотря на усилия Продовольственной и сельскохозяйственной организации (ФАО) по предоставлению глобальных почвенных карт еще в 1980-х годах ([ФАО, 2006](#)), частота использования типов почв не увеличивалась со временем (рис. S6). Вместо этого наблюдается выраженный рост использования данных о текстуре почвы (рис. S6), что хорошо соответствует развитию цифрового картирования почв в 2000-х годах ([Минасни и МакБратни, 2016](#)). Нечастое включение литологических и гидрогеологических дескрипторов (около 20%) может быть связано с ограниченной доступностью высококачественных локальных и региональных источников гидрогеологических и литологических данных (рис. S7). Более того, несмотря на появление глобальных литологических продуктов (например, GLiM, [Hartmann and Moosdorf, 2012](#)) с 2010-х годов, мы не обнаружили увеличения использования соответствующих дескрипторов (рис. S6), что указывает на то, что грубое разрешение и неопределенности глобальных продуктов могут по-прежнему препятствовать характеристике более глубоких недр ([Gleeson et al., 2021](#)).

3.3.3 Ошибка 3: Невнимание к пространственно и вертикально дифференцированным дескрипторам водосбора

Наш анализ методов агрегации для оценки дескрипторов водосборов показал, что большинство дескрипторов агрегируются в сосредоточенной форме (т. е. не учитывают временную, пространственную или вертикальную изменчивость дескрипторов в пределах водосборов) ([рис. 5](#)). Однако дифференцированное по времени агрегирование используется в >30% всех случаев для агрегации дескрипторов из наборов гидрометеорологических данных (например, дескрипторов, которые фиксируют сезонность осадков, температуры, снежного покрова или их временную изменчивость, такую как временной коэффициент вариации или стандартные отклонения). Дифференцированное по времени агрегирование необычно для других источников данных, поскольку они в основном предоставляют статическую информацию (за исключением временных изменений в землепользовании и сезонных колебаний глубины грунтовых вод).



1. [Загрузить: Загрузить изображение в высоком разрешении \(165 КБ\)](#)
2. [Скачать : Загрузить полноразмерное изображение](#)

Рис. 5. Часть дескрипторов, полученных с использованием различных методов агрегирования для каждого основного источника данных (цифровые модели рельефа (*dem*), гидрометеорологические ряды (*hydrometeo*), карты землепользования и растительного покрова, карты антропогенных нарушений (*antro*), гидрогеологические карты (*hydrogeo*), литолого-стратиграфические карты (*litho*), карты типов почв и карты текстуры и глубины почвы).

Вертикально-дифференцированные дескрипторы используются для фиксации изменчивости заданного свойства с глубиной (т. е. для свойств подповерхности) или с высотой (т. е. для свойств поверхности). Почти 40% всех дескрипторов, полученных из цифровых моделей рельефа (например, часть водосбора выше определенной высоты), и около 20% дескрипторов глубины и текстуры почвы (например, доля песка в верхних и нижних слоях почвы) являются вертикально-дифференцированными ([рис. 5](#)). Напротив, существует гораздо меньше дескрипторов, полученных из гидрогеологических или литологических карт, которые отражают вертикальные структуры водосборов (например, различия между доминирующей геологией поверхности и коренной породы или расположением непроницаемых слоев). Стоит отметить, что отсутствие вертикально-дифференцированных дескрипторов для гидрогеологических и литологических карт, вероятно, связано с ограниченной доступностью высококачественной информации об этих свойствах по сравнению, например, с цифровыми моделями рельефа.

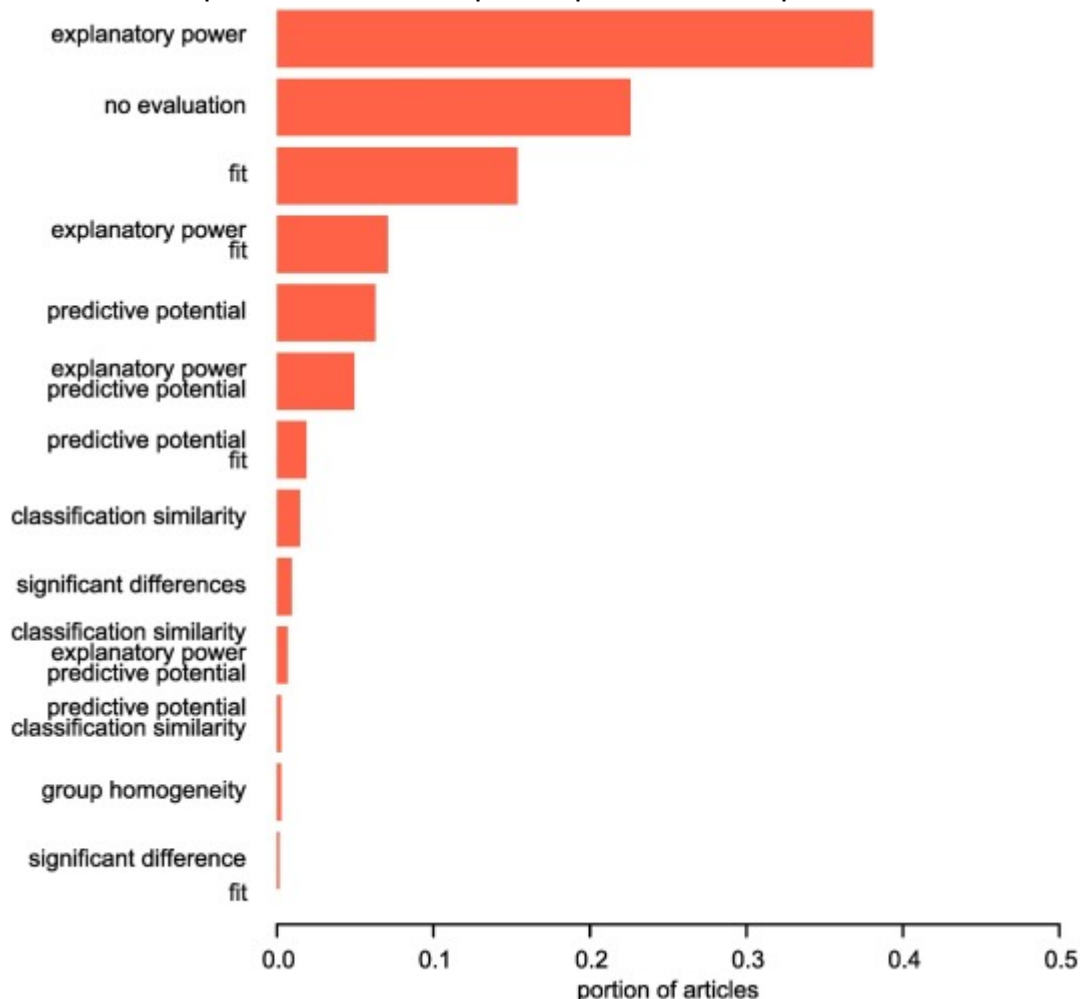
Удивительно, но пространственно-дифференцированная агрегация (например, пространственный коэффициент вариации или стандартное отклонение) редко используется для получения дескрипторов из изученных источников данных ([рис. 5](#)), несмотря на доступность продуктов с сеткой высокого разрешения для источников данных о поверхности (например, <10% всех дескрипторов, полученных для цифровых моделей рельефа и землепользования, являются пространственно-дифференцированными). Еще более удивительно, что, несмотря на многочисленные попытки временно-дифференцированной агрегации дескрипторов из наборов гидрометеорологических данных, практически нет пространственно-дифференцированных дескрипторов (например, пространственный коэффициент вариации или асимметрия индекса засушливости в пределах водосбора), полученных, несмотря на растущее обилие наборов гидрометеорологических сеток высокого разрешения.

Хотя мы не можем количественно исследовать влияние размера водосбора на выбор метода агрегации, поскольку большинство рассмотренных статей предоставляют только диапазон размеров водосборов, маловероятно, что сохранение пространственно-сосредоточенной агрегации обусловлено небольшими площадями исследуемых водосборов. Большинство рассмотренных статей рассматривают в среднем >100 водосборов ([рис. 2 d](#)), что подразумевает большую изменчивость размеров водосборов в рассмотренных исследованиях. Более того, методы агрегации в целом согласованы между различными областями исследований (рис. S11). Пространственно-дифференцированная агрегация данных по землепользованию и литологическим данным немного более распространена в области качества воды (почти 20% исследований) по сравнению со всеми другими областями. Вместо этого пространственно-дифференцированная агрегация дескрипторов (например, распределение сельскохозяйственных площадей в пределах водосбора или их близость к речной сети или стоку) довольно редка в областях исследований озер, водных экосистем, переноса осадков и трассеров (рис. S11). Интересно, что мы не видим никаких изменений в текущей распространенности методов сосредоточенной агрегации даже в более поздних исследованиях, опубликованных после 2010 и 2015 годов (рис. S12), когда наборы геопространственных данных высокого разрешения становятся все более многочисленными.

3.3.4 Ошибка 4 : Отсутствие оценки полезности и анализа неопределенности дескрипторов водосбора

Большинство рассмотренных исследований (почти 40%) оценивают полезность дескрипторов водосбора, исследуя их объяснительную силу, обычно используя простой бикорреляционный анализ ([рис. 6](#)). Однако почти 25% всех исследований не выполняют никакой количественной оценки (т. е. дескрипторы водосбора выбираются субъективно на основе

восприятия авторами полезности дескрипторов водосбора без фактической количественной оценки) и применяют дескрипторы напрямую, например, для сравнения между участками исследования или регионализации. Это, по-видимому, особенно касается области исследований количества воды, где почти 35% всех статей не выполняют никакой оценки (рис. S13). В целом, <10% всех исследований выполняют вневыборочную перекрестную проверку, исследуя прогностический потенциал различных дескрипторов водосбора или их комбинаций.



1. [Загрузить : Загрузить изображение в высоком разрешении \(263 КБ\)](#)
2. [Скачать : Загрузить полноразмерное изображение](#)

Рис. 6. Часть статей, рассматривающих различные подходы к оценке полезности дескрипторов водосбора для целей данного исследования. Интересно, что отсутствие перекрестной проверки можно наблюдать среди всех областей исследований (рис. S13), и мы находим мало доказательств того, что количество попыток оценить дескрипторы водосбора более строго увеличивается (рис. S14). Этот вывод особенно тревожен, поскольку мы наблюдаем увеличение количества рассматриваемых дескрипторов водосбора (с 9,6 до 13 дескрипторов в среднем на статью за последние три десятилетия), что указывает на потенциальное увеличение проблем мультиколлинеарности и водосборов (с 124 до 267 водосборов в среднем на статью за последние три

десятилетия), что потенциально указывает на увеличение размера выборки для анализа перекрестной проверки ([рис. 2 d, e](#)).

Существует несколько источников неопределенности, которые могут быть актуальны для получения и использования дескрипторов водосбора, начиная от выбора исходного продукта данных (например, различные продукты осадков, различные цифровые модели рельефа), разрешения этих продуктов и заканчивая неопределенностью выбора метода агрегации. Среди проанализированных статей мы не обнаружили никаких всесторонних попыток провести анализ неопределенности полученных дескрипторов водосбора, хотя становится все больше информации о внутренних неопределенностях продуктов и все больше альтернативных продуктов, доступных для того же источника данных ([Addor et al., 2020](#)). Это может указывать на постоянную субъективность в выборе дескрипторов водосбора, используемых для анализа, что может привести к предвзятому восприятию их полезности.

4. Дискуссия

Наш систематический анализ выявил четыре важных предубеждения в текущей практике характеристики водосбора ([Раздел 3](#)): 1) недопредставленность засушливых территорий; 2) недопредставленность свойств подповерхности; 3) пренебрежение дифференцированной агрегацией и 4) отсутствие перекрестной проверки оценки и анализа неопределенности дескрипторов водосбора. В этом разделе мы используем несколько примеров для детализации компонентов, в настоящее время отсутствующих в характеристике водосбора ([Таблица 1](#)), и для демонстрации того, как выявленные предубеждения могут повлиять на эффективность характеристики водосбора.

Таблица 1. Сводка основных отсутствующих компонентов для характеристики водосбора, подробно изложенных в [4.1 Отсутствующие компоненты для характеристики водосбора в засушливых условиях](#) , [4.2 Отсутствующие компоненты для характеристики подповерхности](#) , [4.3 Отсутствующие компоненты дифференцированной агрегации в характеристике водосбора](#) и соответствующие предполагаемые гидрологические функции, которые представляют эти компоненты.

Отсутствующие компоненты	Предполагаемая гидрологическая функция и значимость
Характеристика водосбора в засушливых условиях (Раздел 4.1)	
Свойства поверхностного покрытия	Каменистый поверхностный покров и биологические корки модулируют инфильтрационную способность на участках без растительности Старые покрытия ограничивают инфильтрационную способность, в то время как более старые и более структурированные почвы имеют более низкую гидравлическую проводимость.
Эпоха пустынных мостовых	Химическая трансформация почв может влиять на пополнение
Латеризация почвы	Может влиять на гидрологическую связность путем модуляции поверхностного и мелководного подповерхностного ливневого потока
Пространственная структура растительности	Может контролировать поток через аллювий русла реки
Текстура русла реки	Отвечает за высокую изменчивость гидрологических реакций даже в малых масштабах, требуя пространственно-дифференцированной характеристики.
Пространственная изменчивость количества осадков	
Характеристика недр водосборов (Раздел 4.2)	
Неконсолидированные отложения	Контролировать изменчивость подземного потока и емкости водохранилища даже в водосборах со схожим типом коренной породы;

Отсутствующие компоненты	Предполагаемая гидрологическая функция и значимость
Глубина выветренной или трещиноватой коренной породы	особенно важно в постледниковых и аллювиальных регионах Контролирует влажность горных пород и циркуляцию глубоких грунтовых вод
Вторичная проницаемость (зрелость коренной породы)	Характеризует структуру и проницаемость коренных пород, влияющих на пополнение и подземный поток даже в водосборах с одинаковым типом коренных пород.
Ориентация дна водоносного горизонта	Определяет межбассейновый поток грунтовых вод и условия набора/потери в ручьях.
Структура почвы	Изменяет гидравлические свойства почв, даже если они относятся к одному классу текстуры

Дифференцированная агрегация в характеристике водосбора ([раздел 4.3](#))

Особенности, которые следует учитывать при вертикально-дифференцированной характеристике ([Раздел 4.3.1](#))

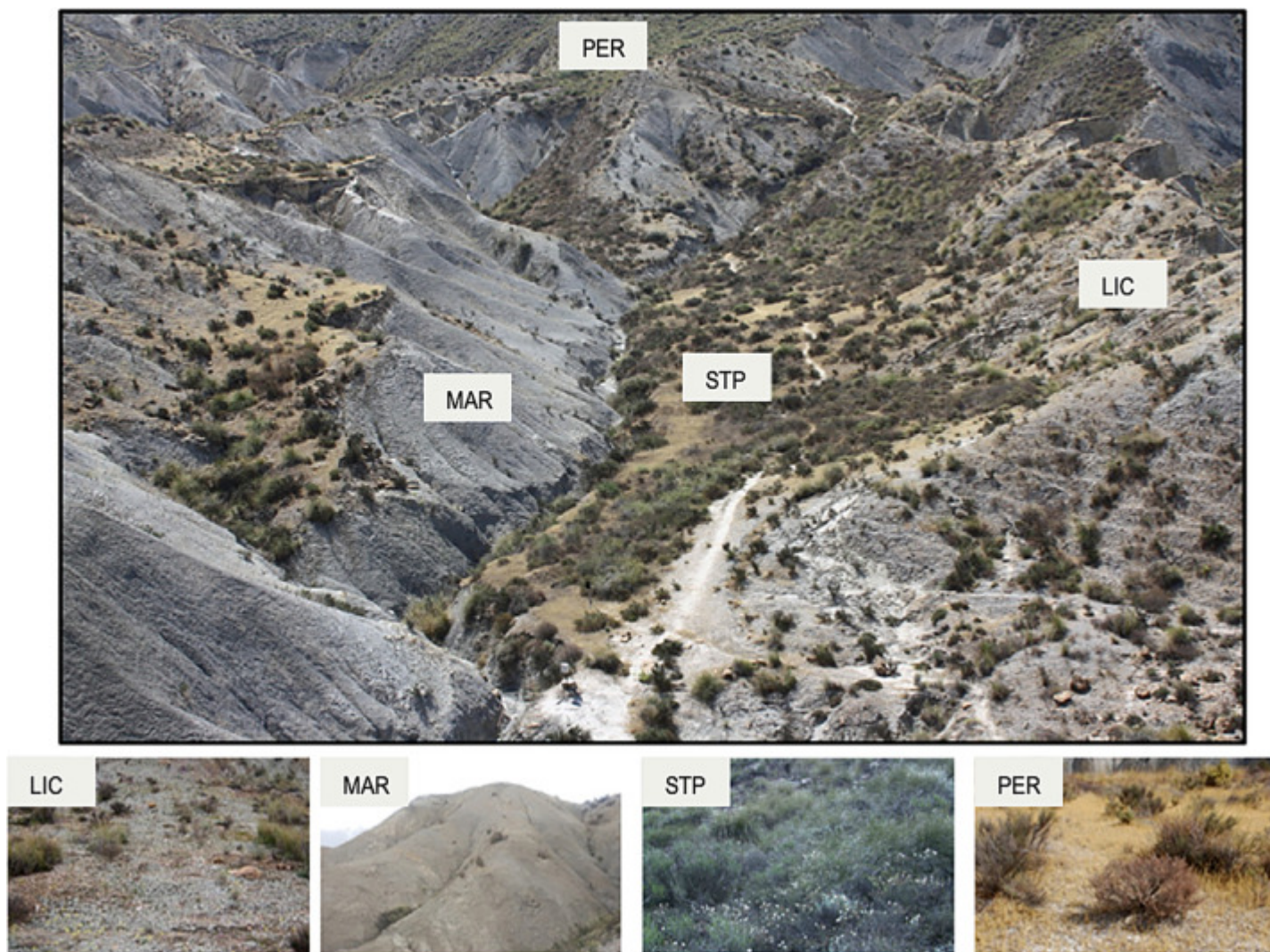
Препятствующие слои	Ограничить доступное хранилище и привести к более резкой реакции стока
Топография коренных пород	Способствует нелинейности реакции стока
Глубина активного течения	Определяет пути глубокого потока, продолжительность времени транзита и эффекты наследия
Методы учета пространственной организации при агрегировании дескрипторов водосбора (раздел 4.3.2)	
Близость объекта (например, класса землепользования) к точке выхода	Прокси-коэффициент времени распространения, характеризующий возможную степень затухания за счет водосбора, речной сети и внутриусловных процессов
Близость объекта к ближайшему ручью	Прокси-данные ландшафтных зон (например, склонов холмов, прибрежных зон), связанных с переменным потенциалом для различных процессов формирования стока
Распределение объекта относительно речной сети	Характеризует архетипы организации объектов, которые развиваются вдоль речных сетей.

4.1 . Недостающие компоненты характеристики водосбора в засушливых условиях

Несмотря на недавно появившиеся большие выборочные наборы данных для стран с большой долей засушливых климатических зон (например, CAMELS-CL для Чили ([Alvarez-Garreton et al., 2018](#)), CAMELS-AUS для Австралии ([Fowler et al., 2021](#)) и CCAM для Китая ([Hao et al., 2021](#))), доминирование исследований характеристик водосборов во влажных средах подразумевает, что текущие дескрипторы специально адаптированы к таким средам и могут быть менее эффективными для водосборов с ограниченным количеством воды. Фактически, среды с ограниченным количеством воды часто связаны с выраженным пороговым поведением и высокой пространственной неоднородностью ([Rodríguez-Caballero et al., 2014](#) ; [Jiang et al., 2023](#)). В отличие от сред с ограниченной энергией, пространственная изменчивость и пространственная динамика осадков ([Puigdefabregas et al., 1999](#) ; [Morin et al., 2006](#)), региональный поток грунтовых вод ([Fan, 2019](#) ; [Gordon et al., 2022](#)), эвапотранспирация и существенная потеря воды в подземные слои ([Liu et al., 2020](#)), а также взаимодействие поверхностных и подземных вод в гипорейной зоне теряющих эфемерных потоков ([Kampf et al., 2016](#)) могут играть решающую роль, указывая на то, что для эффективного представления функционирования гидрологических систем с ограниченной водой могут

потребоваться потенциально разные дескрипторы. Значительный объем эмпирических исследований регионализации подтверждает, что **разные дескрипторы актуальны в сухих и влажных средах** ([Turnipseed and Ries, 2006](#) ; [Stein et al., 2021](#)) . Более того, различия в гидрологических процессах сухих и влажных сред ([Данн, 1978](#) ; [Ли и др., 2014](#)) также требуют различных дескрипторов водосборов для характеристики этих контрастных областей.

В частности, в засушливых условиях **свойства поверхностного покрова** (т. е. скальный или почвенный покров) могут играть более важную роль в процессах генерации стока по сравнению с климатическими факторами ([Yair and Kossovsky, 2002](#) ; [Kampf et al., 2018](#)), поскольку наличие каменного покрова значительно влияет на скорость инфильтрации ([Abrahams and Parsons, 1991](#)). Оценка гидравлической проводимости особенно сложна в полужасушливых регионах, где **коркование и уплотнение почв** играют важную роль ([Becker et al., 2018](#)). В таких регионах данные дистанционного зондирования поверхности почв могут быть гораздо более точным показателем гидравлической проводимости, чем оценки с помощью функций педопереноса ([Becker et al., 2018](#)). **Возраст пустынных мостовых** (также называемых каменными мостовыми и регио-почвами; [Springer, 1958](#)), которые представляют собой один или два слоя плотно упакованных обломков, встроенных в мелкозернистый почвенный горизонт, также может играть важную роль в процессах генерации стока в засушливых и гиперзасушливых средах ([McFadden et al., 1987](#)). Более старые пустынные мостовые связаны с более низкой инфильтрационной способностью ([Wells et al., 1985](#)), в то время как более старые и более структурированные почвы под пустынными мостовыми имеют более низкую гидравлическую проводимость, чем более молодые почвы ([Meadows et al., 2008](#)). Более того, биологические почвенные корки (которые представляют собой сложные сообщества цианобактерий, водорослей, грибов, бриофитов и лишайников, [рис. 7](#)) могут быть еще одним фактором, модулирующим способность поверхностной инфильтрации в не покрытых растительностью областях ([Rodríguez-Caballero et al., 2014](#) ; [Marchamalo et al., 2016](#)). Поэтому дальнейшее исследование пространственного **распределения покрытых и не покрытых коркой почвенных поверхностей** может быть полезным для понимания процессов генерации стока в засушливых средах ([Wei et al., 2015](#) ; [Kampf et al., 2018](#)). Наконец, **латеризация почвы**, процесс выветривания, включающий химическую трансформацию почв, типична для тропических и субтропических сред с длительным засушливым периодом, но ее потенциальное влияние на процессы пополнения все еще плохо изучено ([West et al., 2022](#)).



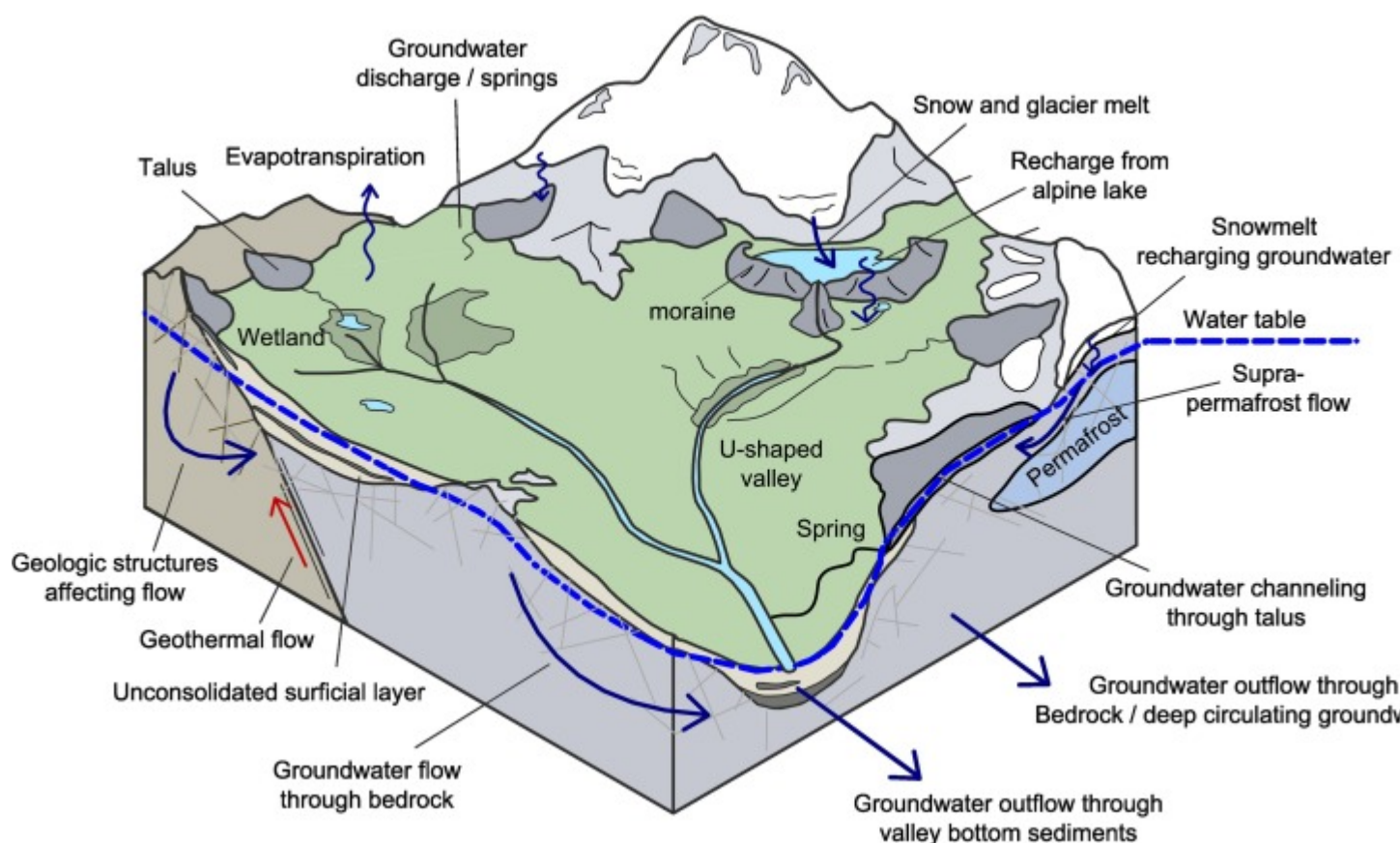
1. [Загрузить](#) : [Загрузить изображение в высоком разрешении \(861 КБ\)](#)
2. [Скачать](#) : [Загрузить полноразмерное изображение](#)

Рис. 7. Свойства **поверхностного покрова, коркование почвы и структура растительности — недостающие компоненты характеристики водосбора в засушливых условиях**. Полузасушливый водосбор Эль-Каутив (Испания): LIC — склоны холмов, покрытые лишайниками; MAR — голая почва, физически покрытая коркой; STP — растительность ниже по течению склонов холмов, покрытая лишайниками; PER — верховья, в которых преобладают высокие многолетние травы. Этот пример иллюстрирует высокую пространственную изменчивость поверхностного покрова в засушливых условиях, где способность инфильтрации в не покрытых растительностью областях может сильно зависеть от образования почвенной корки. Способность инфильтрации в покрытых растительностью областях может зависеть от пространственной структуры участков с растительностью, несмотря на их ограниченную абсолютную протяженность. Изменено из [Rodríguez-Caballero et al. \(2014\)](#) с разрешения Elsevier. В засушливых средах, где педогенные процессы протекают медленно, растительность играет очень важную роль в регуляции скорости

поверхностной инфильтрации ([Caldwell et al., 2012](#)). [Томпсон и др. \(2010\)](#) показали, что биомасса играет решающую роль в инфильтрации в широком диапазоне сред с ограниченным количеством воды, потенциально даже перевешивая важность типов почв. Исследования [Пучдефабрегаса и др. \(1999\)](#) , [Лесшена и др. \(2009\)](#) и [Марчамало и др. \(2016\)](#) также предоставляют доказательства того, что пространственное распределение участков растительности ([рис. 7](#)) и расположение террас определяют гидрологическую связность и контролируют транспорт осадка в засушливых средах. Например, инфильтрация чаще происходит вблизи участков растительности по сравнению с бесплодными территориями ([Lesschen et al., 2009](#)). Более того, вторжение древесной растительности в засушливые и полузасушливые среды, несмотря на их весьма ограниченную абсолютную площадь земельного покрова, может оказать значительное влияние на возникновение поверхностных ([Pierini et al., 2014](#)) и подземных ливневых потоков ([Wilcox et al., 2008](#)), что указывает на то, что особое внимание следует уделять характеристике структуры **растительного покрова** в засушливых средах. В засушливых условиях, где преобладают непостоянные водотоки ([Messenger et al., 2021](#)), поток через аллювий русла реки также может играть важную роль ([Kampf et al., 2016](#)), что указывает на то, что **текстура русла реки** также может быть важным дескриптором. Наконец, засушливые и полузасушливые среды характеризуются **высокой пространственной изменчивостью осадков** ([Goodrich et al., 1995](#)), и имеются существенные доказательства, указывающие на императивную роль пространственной структуры осадков и их распространения в пределах водосбора для соответствующей реакции стока ([Syed et al., 2003](#) ; [Morin et al., 2006](#)). Градиент годовой изменчивости осадков очень крутой в засушливых средах, что приводит к разрозненным реакциям водосбора даже в очень малых масштабах ([Belacsén et al., 2017](#)), что предполагает, что наши общие методы пространственно-сосредоточенной агрегации могут быть особенно плохо подходящими в таких средах. Поскольку генерация стока в засушливых средах в основном связана с избыточной инфильтрацией ([Dunne, 1978](#)), крайне важно точно охарактеризовать области с высокой интенсивностью осадков и уловить ее пространственно-временную изменчивость ([Yakir and Morin, 2011](#)). Такая сильная пространственная изменчивость компонентов гидрологического цикла и сопутствующие разреженные сети наблюдений также могут привести к увеличению неопределенности дескрипторов водосбора в засушливых средах (например, [Gordon et al., 2022](#)). Точная характеристика засушливых сред особенно важна в свете обострения экстремальных климатических явлений, которые непропорционально повлияют на эти области ([Middleton and Sternberg, 2013](#)).

4.2 Недостающие компоненты для характеристики недр

В отличие от сухих и засушливых сред, подповерхностный поток является доминирующим механизмом генерации стока в умеренном климате ([Hewlett and Hibbert, 1967](#)). Однако мы обнаружили, что в текущей характеристике водосбора подповерхностные свойства в значительной степени недопредставлены ([рис. 4](#)) и редко агрегируются пространственно или вертикально дифференцированным образом ([рис. 6](#)). Более того, используемые в настоящее время дескрипторы не обязательно могут быть репрезентативными для гидрологической динамики водосборов. Хотя информация о типе невыветренной коренной породы часто доступна (например, [Hartmann and Moosdorf, 2012](#)), она не всегда может быть полезной без информации о **геоморфологической обстановке**. Например, наличие и толщина осадочных отложений и нетронутого реголита (выветренной коренной породы) имеют решающее значение для гидрологических и биогеохимических реакций ландшафтов ([Pelletier et al., 2016](#)), а первые особенно важны в осадочных регионах, таких как аллювиальные равнины и постледниковые ландшафты ([Gleeson et al., 2014](#)). Такая информация о **рыхлых отложениях** была недавно добавлена к глобальным литологическим и подповерхностным картам проницаемости ([Börker et al., 2018](#) ; [Huscroft et al., 2018](#)), но, как показал наш анализ, она по-прежнему редко используется в исследованиях характеристик водосбора. Более того, информация о **глубине выветренной или трещиноватой коренной породы** остается скудной или очень неопределенной, особенно в крупных масштабах, хотя все больше исследований предоставляют доказательства важности влажности горных пород ([McCormick et al., 2021](#)) и глубокой циркуляции грунтовых вод ([Fujimoto et al., 2016](#) ; [Somers and McKenzie, 2020](#)) для гидрологических и биогеохимических циклов ([рис. 8](#)). Недавно появляющиеся и недостаточно используемые источники данных, такие как метаданные наборов данных скважин подземных вод, могут предоставить более полную и точную информацию о глубине водоносного горизонта и других характеристиках коренной породы (например, [Perrone and Jasechko, 2017](#) ; [Mulroe et al., 2023](#)), чем крупномасштабные наборы данных о свойствах недр. Не только толщина, но и **ориентация dna водоносного горизонта** и его (не)сходство с рельефом поверхности определяют направление регионального потока грунтовых вод и определяют наличие межводосборного потока грунтовых вод ([Liu et al., 2020](#)). Последнее может влиять на условия увеличения и уменьшения потока ([Fan, 2019](#)), смягчать или усугублять тяжесть засух потока ([Hellwig et al., 2022](#)) и влияет на нелинейность отношений между запасами и расходом воды во время низких потоков и, следовательно, на устойчивость водосбора к засухам ([Ли и Амели, 2023](#)).



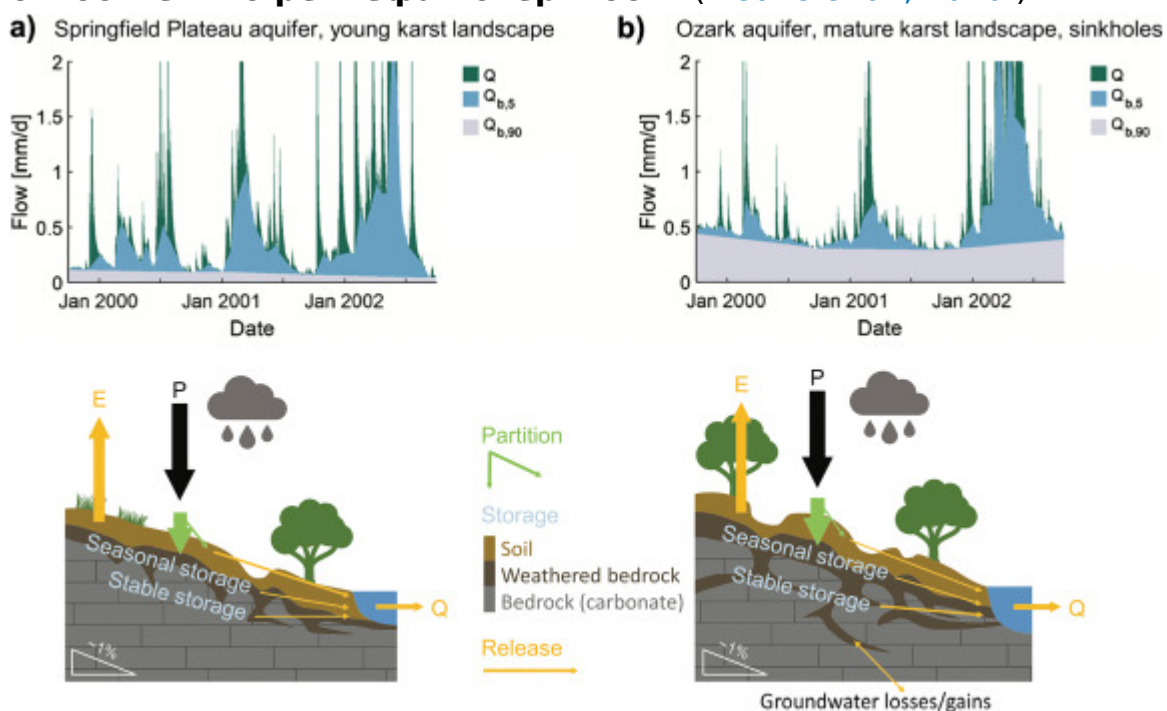
1. [Загрузить](#) : [Загрузить изображение в высоком разрешении \(763 КБ\)](#)
2. [Скачать](#) : [Загрузить полноразмерное изображение](#)

Рис. 8. Неконсолидированные **отложения и глубина выветренной/трещиноватой коренной породы — недостающие компоненты для характеристики недр.**

Перцептивная модель, иллюстрирующая сложность высокогорных гидрогеологических процессов с потоком грунтовых вод через склоны осыпей, морены, донные отложения долин и трещиноватые/выветренные коренные породы, включая глубокую циркуляцию. Этот пример иллюстрирует, что литологическая информация о невыветренной коренной породе, которая часто используется для характеристики недр, может быть недостаточной без информации о геоморфологических условиях и глубине выветренной коренной породы. Из [Somers and McKenzie \(2020\)](#) , CC-BY.

Другим важным аспектом, который редко учитывается при подземной характеристике водосборов, является **вторичная проницаемость** (т. е. проницаемость, развивающаяся в породе после ее отложения или размещения). [Scibek et al. \(2016\)](#) обнаружили на основе данных из длинных туннелей, что 40–80% всех разломов в кристаллических породах и 30–70% всех разломов в осадочных породах являются высокопроницаемыми. Вторичная проницаемость особенно влияет на поведение карстовых систем, что приводит к их значительной неоднородности ([Bakalowicz, 2005](#)). Структура карстовых систем и соответствующее пополнение сильно различаются в зависимости от климатических и топографических регионов ([Hartmann et al.,](#)

2015 ; Hartmann et al., 2017). Однако, хотя литологические карты часто сообщают о наличии карста или даже более общих карбонатных пород, информация о **степени карстификации** редко доступна, что приводит к ошибочному ожиданию сходства гидрологического отклика в водосборах, лежащих в основе одного и того же литологического класса (рис. 9). Степень карстификации связана со зрелостью карста, что указывает на то, что дополнительная информация о геологическом возрасте может дать полезную информацию для понимания изменчивости отклика в пределах карстовых регионов (Gnann et al., 2021). Эффект **вторичной проницаемости** может быть актуален не только для карбонатных пород. Вулканические породы могут быть связаны с очень разными процессами генерации стока, поскольку выветривание постепенно формирует поверхностные дренажные сети, способствующие быстрым компонентам потока по сравнению с более молодыми ландшафтами с преобладанием базового потока с высокой проницаемостью (Jefferson et al., 2010). Метаморфические породы также могут иметь очень контрастные гидравлические свойства просто из-за различий в **ориентации относительно рельефа поверхности** (Leone et al., 2020).



1. [Загрузить: Загрузить изображение в высоком разрешении \(475 КБ\)](#)
2. [Скачать : Загрузить полноразмерное изображение](#)

Рис. 9. Вторичная **проницаемость** — **отсутствующий компонент для характеристики подповерхности**. Контрастные гидрографы (Q — общий сток; $Q_{b,5}$ — базисный сток, определенный с использованием метода сглаженных минимумов с временным окном 5 дней; $Q_{b,90}$ — базисный сток, определенный с использованием того же метода с временным окном 90 дней) двух соседних водосборов: Turnback Creek выше Гринфилда (a) и Current River в Van Buren (b) и соответствующие им перцептивные модели (нижняя панель). Ширина стрелок указывает

количество воды относительно нормализованного поступления осадков. Этот пример иллюстрирует значительные различия в динамике базисного стока в двух водосборах, расположенных в Озарксе (Миссури, США), которые, несмотря на близость, залегают на карбонатных породах разной зрелости. Из [Gnann et al. \(2021\)](#) с разрешения Американского геофизического союза.

Другими потенциальными препятствиями для комплексной характеристики подповерхности водосборов являются методы, которые мы в настоящее время используем для **получения гидравлических свойств почвы** (например, насыщенной гидравлической проводимости). Эти методы основаны на экстраполяции атрибутов почвы, измеренных в нескольких локальных образцах почвы, которые могут быть нерепрезентативными в более крупных (от водосбора до региона) масштабах ([Gutmann and Small, 2007](#) ; [Or, 2020](#)). Кроме того, гидрологическое функционирование почв может сильно различаться в зависимости от структуры почвы ([Gerke and van Genuchten, 1993](#)) и может быть сильно обусловлено биофизической активностью ([Jarvis et al., 2013](#)), которая не учитывается в функциях педопереноса, используемых для получения гидравлических свойств почвы ([Fatichi et al., 2020](#) ; [Bonetti et al., 2021](#)). Текущие функции педопереноса в значительной степени зависят от информации о текстуре почвы ([Vereecken et al., 2010](#) ; [Van Looy et al., 2017](#)), хотя изменчивость гидравлических свойств почвы в пределах одного класса может быть даже больше, чем между классами ([Gutmann and Small, 2007](#)). Эти упущения указывают на то, что огромные неопределенности, вероятно, присущи полученным гидравлическим свойствам почвы ([Paschalis et al., 2022](#)), которые мы в настоящее время используем для характеристики подземного водосбора. Наложение множественных физических ограничений, учитывающих **влияние растительности и структуры почвы** на инфильтрацию, может улучшить современные функции педопереноса и привести к более точному представлению гидрологических процессов в почве в более крупном масштабе ([Lehmann et al., 2020](#)).

4.3. Отсутствующие компоненты дифференцированной агрегации в характеристике водосбора

4.3.1 Вертикальная слоистость

Вертикальная **архитектура критической зоны** играет решающую роль в процессах генерации стока и не разрешена в большинстве используемых в настоящее время дескрипторов. **Наличие, уровень разрыва** и особенно **глубина препятствующих слоев** (например, неглубокие слои богатой глиной аргиллитовой почвы, глинистые линзы) оказывают решающее влияние на гидрологический отклик, хорошо документированный в небольших исследовательских водоразделах (например, [Gannon et al., 2014](#) ; [Zimmer and McGlynn, 2017](#)), но также и в региональном масштабе ([Tarasova et al., 2018](#) ; [Zimmer and Gannon, 2018](#)). Наличие препятствующего слоя может ограничить доступное подземное

хранилище водосбора и привести к более яркой реакции стока ([Zimmer and McGlynn, 2017](#) ; [Tarasova et al., 2018](#)). Например, [Циммер и Ганнон \(2018\)](#) показали, что, несмотря на низменный рельеф, более глубокую критическую зону и выветренную коренную породу, базовый сток водосборов в регионе Пенсильванского Пьемонта гораздо более чувствителен к изменчивости осадков, чем в горном регионе Аппалачей с неглубокой коренной породой. Это можно объяснить наличием неглубокого и непрерывного препятствующего слоя, который значительно ограничивает доступную емкость хранения и, следовательно, способность буферизировать изменчивость климата, делая водосборы Пьемонта потенциально более чувствительными к изменению климата. **Топография коренной породы**, особенно ее отличие от топографии поверхности, может быть еще одним фактором, модулирующим процессы генерации стока и нелинейность штормового потока в умеренном климате ([Freer et al., 2002](#) ; [Tromp-Van Meerveld and McDonnell, 2006](#)). Определение **глубины активного потока** (или дна водосбора) является еще одним важным компонентом, который плохо отражен в наших текущих методах характеристики водосбора, но который очень важен для понимания вклада более глубоких путей потока в реакцию водосбора ([Кондон и др., 2020](#)) и изменчивости моделей выноса растворенных веществ и унаследованных загрязнений на различных водосборах ([Ван Метер и др., 2017](#)).

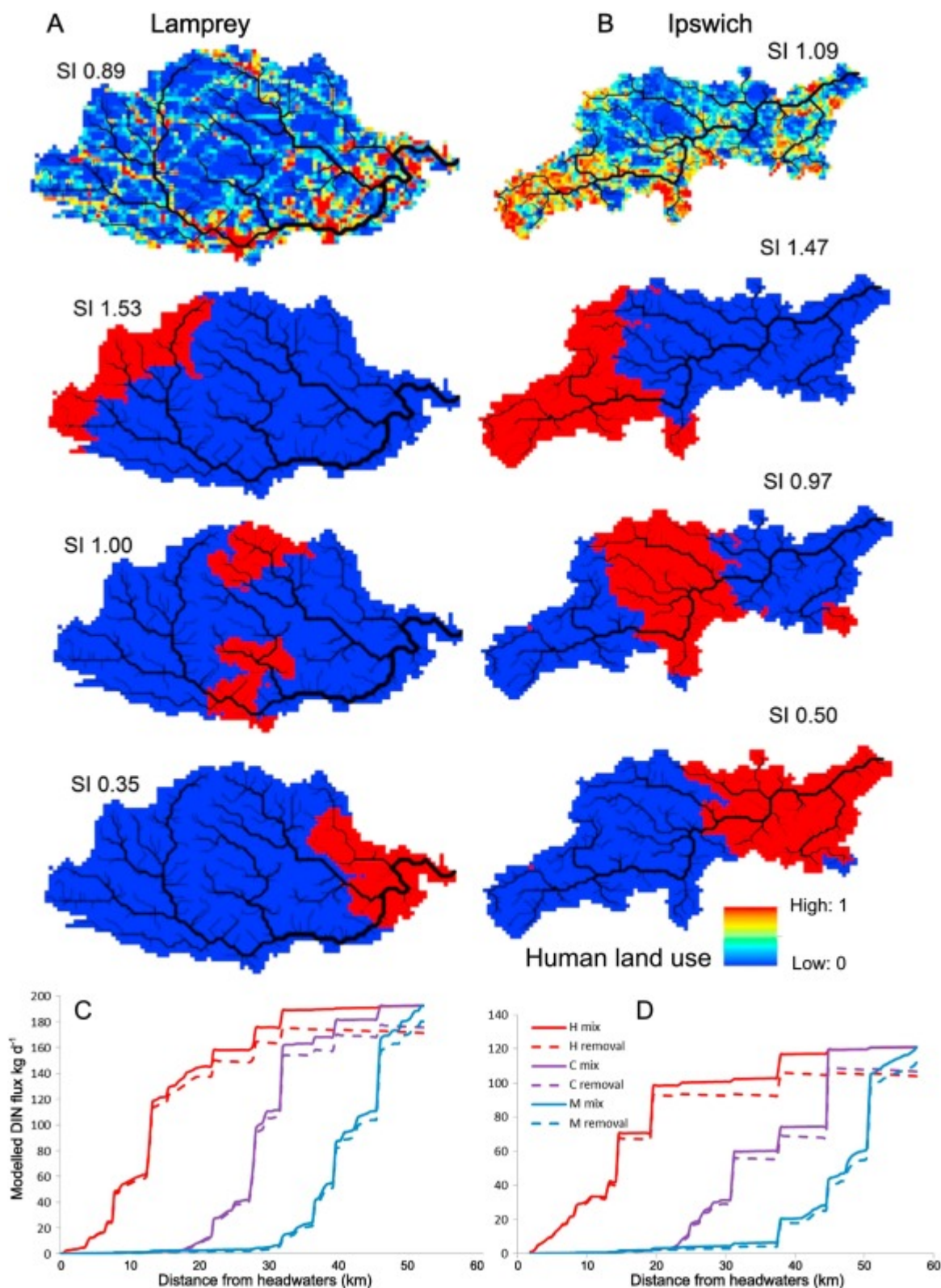
4.3.2 Пространственная организация

В [разделе 3](#) мы выявили поразительное отсутствие пространственно-дифференцированных дескрипторов ([рис. 6](#)). Это касается даже тех свойств поверхности, которые в настоящее время можно легко получить из доступных наборов данных с сеткой высокого разрешения. Тем не менее, пространственная организация форм ландшафта в пределах водосборов может иметь решающее значение для формирования процессов генерации стока ([Loritz et al., 2019](#)), в то время как **пространственное распределение** землепользования играет решающую роль в формировании моделей экспорта питательных веществ в соседние потоки ([Musolff et al., 2017](#)) и определяет наличие конкурирующих пелагических и бентосных сообществ водорослей вдоль речных сетей ([Yang et al., 2021a](#)).

Мы определили несколько подходов, которые пытаются охватить пространственное распределение в пределах водосборов, либо рассматривая расстояние поверхностного потока до выхода или ближайшего потока (т. е. точки стока), либо рассматривая организацию речной сети (например, порядки потоков). Ниже мы выделяем несколько потенциальных методов, которые доступны (но редко применяются) для пространственно-дифференцированной характеристики водосбора.

Близость к выходу часто используется в качестве прокси-параметра длины пути потока через подземную и речную сеть ([Viglione et al., 2010](#)) и может быть полезна для учета эффектов затухания речных сетей на

гидрологические реакции водосборов. Индекс асимметрии является одним из показателей, который количественно определяет пространственное распределение элементов в пределах водосборов, вычисляемых как отношение средней длины потока от интересующего элемента в пределах водосбора, взвешенное по средней длине пути потока всего водосбора ([Mineau et al., 2015](#) , [рис. 10](#)). В случае источников питательных веществ (таких как антропогенное землепользование) их расстояние до выхода измеряется как расстояние каждого элементарного участка до выхода ([Ye et al., 2020](#)) и по сути предоставляет информацию о первичном местоположении интересующего элемента относительно выхода водосбора (т. е. вблизи выхода, вокруг центроида водосбора или сосредоточенного в верховьях, [рис. 10](#)). Приведенный выше пример показывает, что, несмотря на одинаковую долю антропогенного использования земель (наиболее популярный метод агрегации для характеристик землепользования, [рис. S2b](#)), удаление и экспорт питательных веществ могут значительно различаться из-за контрастного пространственного распределения потенциальных источников. Аналогично характеристикам землепользования, взвешивание по расстоянию до выхода может применяться к любой числовой или категориальной переменной, чтобы обеспечить пространственно-дифференцированную характеристику водосбора.



1. [Скачать: Загрузить изображение в высоком разрешении \(1012 КБ\)](#)
2. [Скачать : Загрузить полноразмерное изображение](#)

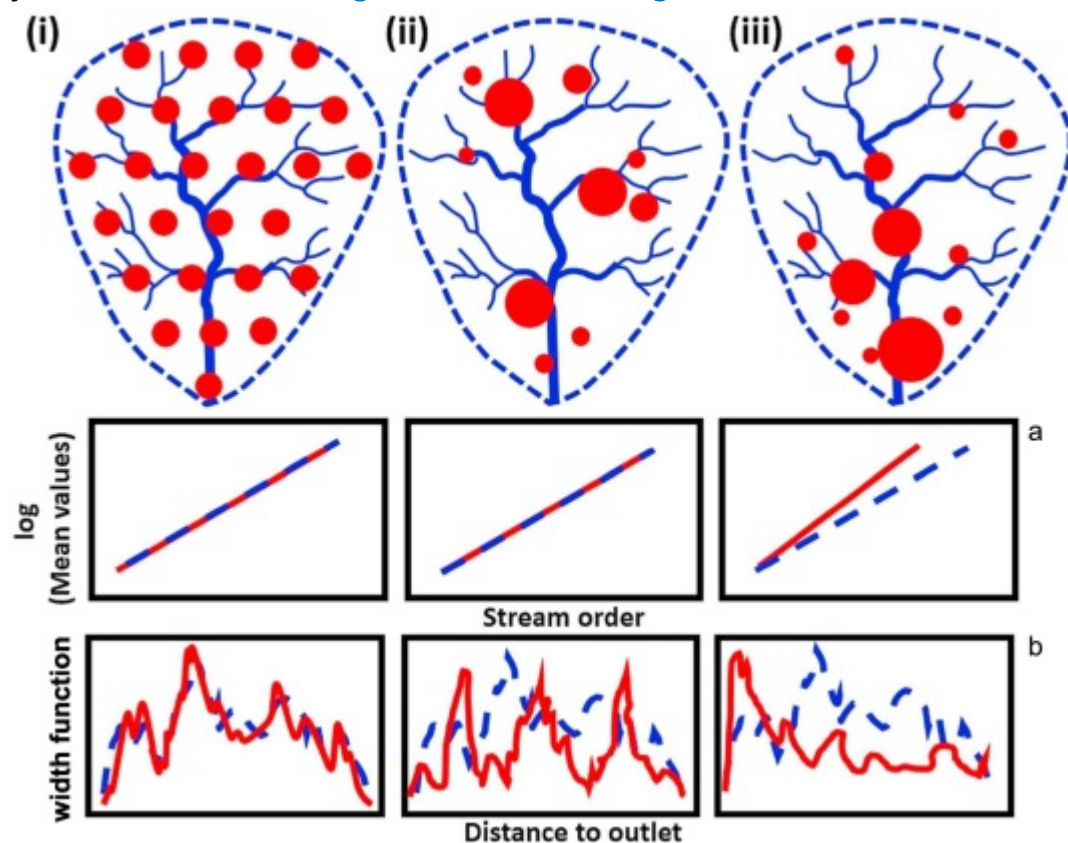
Рис. 10. Расстояние **до выхода — отсутствующий компонент дифференцированной агрегации в характеристике водосбора**. Влияние пространственного распределения использования человеком земель (освоенных и сельскохозяйственных земель) на экспорт и удаление нитратов: фактическое пространственное распределение

(верхняя панель) и три сценария, соответствующие разному индексу асимметрии (SI) для водосбора реки Минога (A) и для водосбора реки Ипсвич (B). Нижняя панель показывает смоделированный растворенный неорганический азот (DIN) для трех сценариев: использование человеком земель, в основном расположенных в верховьях (H, $SI > 1$), сосредоточенных в середине водосбора (C, $1 > SI > 0,5$) или расположенных в основном близко к устью (M, $SI < 0,5$). Сплошная линия соответствует консервативному смешиванию DIN (смешивание), пунктирная линия соответствует моделированию с процессами в русле (удаление). Этот пример иллюстрирует, что в зависимости от расположения источника азота относительно выхода водосбора (т. е. пространственно-дифференцированный дескриптор) эффективность удаления нитратов различается, что приводит к разной концентрации DIN на выходе, даже если часть водосбора, охваченная определенным землепользованием (т. е. пространственно-объединенный дескриптор), одинакова. Из [Mineau et al. \(2015\)](#), CC-BY.

Близость к **ближайшему ручью** часто рассматривается как показатель времени в пути и может быть также связана с эффективностью процессов естественного затухания ([Ebeling et al., 2021](#) ; [Saavedra et al., 2022](#)), но также может служить мерой подверженности речным опасностям ([Ceola et al., 2014](#)). Фактически, мера близости к ближайшему ручью, выраженная как высота над ближайшим дренажем (HAND), часто используется для классификации ландшафтов (днища долин, склоны холмов, [Gharari et al., 2011](#) ; [Nobre et al., 2011](#)) в распределенном гидрологическом моделировании ([Gao et al., 2019](#)) и может использоваться в качестве метрики для пространственно-дифференцированной характеристики водосбора ([Loritz et al., 2019](#)). Это может быть особенно полезно, поскольку хранилища, расположенные близко к ручью (например, прибрежные зоны и аллювиальные водоносные горизонты долин), несмотря на их небольшую общую площадь, являются очагами биогеохимической активности, которая может существенно влиять на концентрацию питательных веществ в ручьях ([Lutz et al., 2020](#)) и важна для формирования речного стока ([Glaser et al., 2018](#)), особенно в засушливые периоды ([Käser and Hunkeler, 2016](#) ; [Li and Ameli, 2023](#)).

Наконец, не только расстояние до устья или ближайшего потока, но и сама **организация речной сети** с точки зрения ее геометрической и топологической структуры может играть важную роль в формировании гидрологических и гидрохимических процессов ([Rodriguez-Iturbe and Rinaldo, 2001](#) ; [Helton et al., 2018](#) ; [Basso et al., 2023](#)) и может предоставлять важную вспомогательную информацию для облегчения пространственно-дифференцированного агрегирования дескрипторов водосбора. Топологическая структура речной сети может быть количественно определена с использованием **упорядочения потоков** и **эмпирических законов масштабирования** ([Horton,](#)

1945 ; Schumm, 1956 ; Strahler, 1957). Законы упорядочения и масштабирования потоков могут быть полезны для определения архетипов организации различных свойств, которые имеют тенденцию развиваться вдоль речных сетей (рис. 11), таких как прибрежная растительность (Dunn et al., 2011), человеческие поселения (Fang et al., 2018), модели землепользования (Kang et al., 2008 ; Miyamoto et al., 2011) или источники загрязнения питательными веществами (Yang et al., 2021b). **Функция ширины** (Rinaldo et al., 1991 ; Marani et al., 1994), которая представляет распределение расстояний до выхода в пределах водосборов (рис. 11), является еще одной метрикой для захвата топологической структуры речных сетей и для вывода характерного гидрологического отклика сетей различной формы (Moussa, 2008). Более того, сходство/различие между функциями ширины речных сетей и антропогенными особенностями ландшафта, такими как населенные пункты или мощность очистных сооружений, может стать полезным инструментом для оценки антропогенного воздействия и выявления уязвимых мест (Fang et al., 2018 ; Yang et al., 2019).



1. [Загрузить: Загрузить изображение в высоком разрешении \(543 КБ\)](#)
2. [Скачать : Загрузить полноразмерное изображение](#)

Рис. 11. Организация **речной сети** — **отсутствующий компонент дифференцированной агрегации в характеристике водосбора**. Три возможных архетипа организации человеческих поселений в пределах водосборов относительно речной сети: i) однородное пространственное распределение; ii) неструктурированная кластеризация вдоль речных

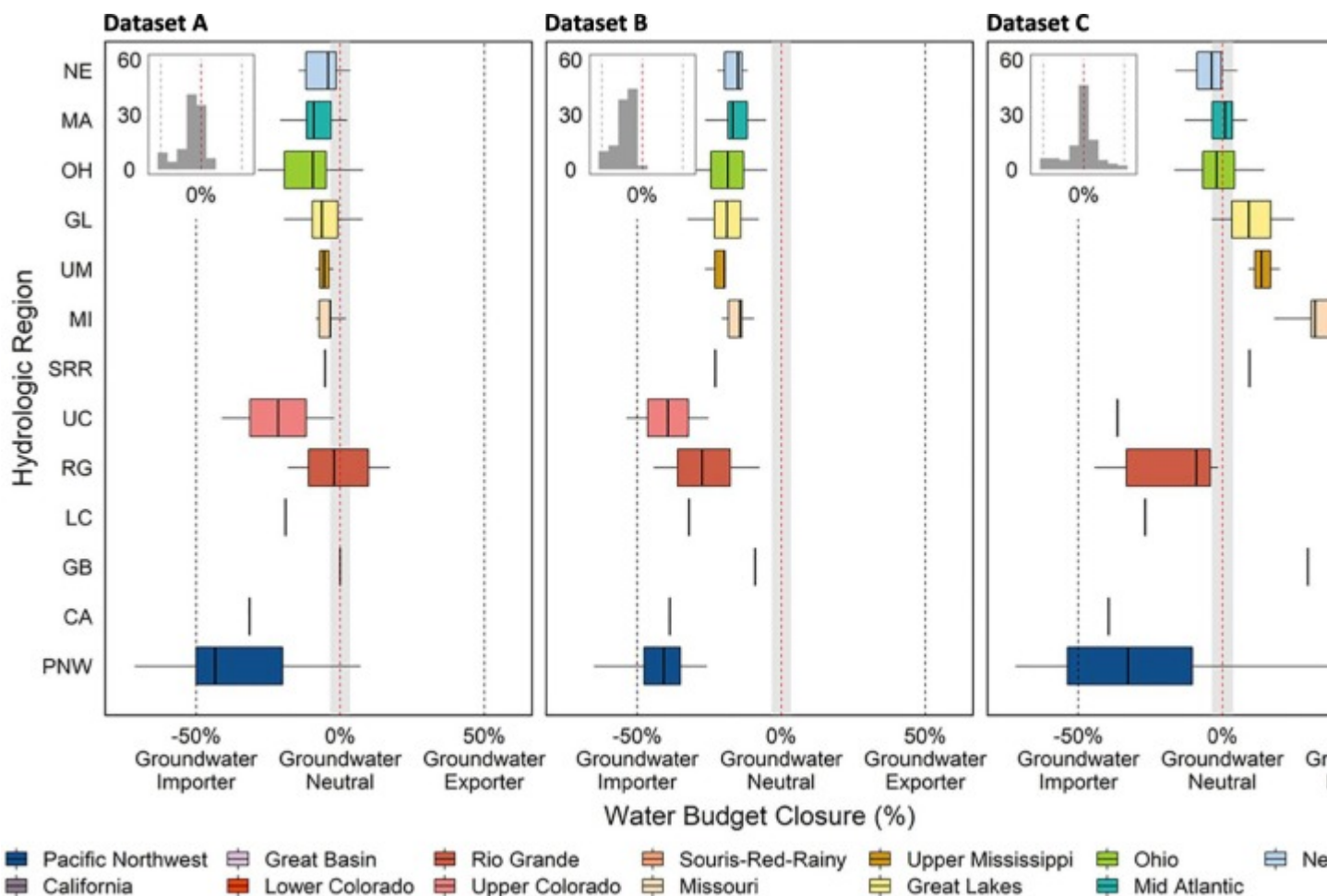
сетей; iii) кластеризация вниз по течению и соответствующее представление в виде а) законов Хортон, основанных на порядке потока, и б) функции ширины, основанной на расстоянии до выхода. Синяя линия представляет речную сеть, а красная линия представляет человеческие поселения. Этот пример иллюстрирует, как информация о речной сети или порядке потока может использоваться в качестве вспомогательной информации для эффективного агрегирования информации о землепользовании (т. е. человеческих поселений) пространственно-дифференцированным способом. Из [Fang et al. \(2018\)](#) , CC-BY. (Для интерпретации ссылок на цвет в этой легенде рисунка читатель отсылается к веб-версии этой статьи.)

4.4 Недостаточные компоненты для оценки и анализа неопределенности в характеристике водосбора

4.4.1 Неопределенность исходных геопространственных наборов данных
Поскольку дескрипторы водосбора выводятся из геопространственных наборов данных и временных рядов, они наследуют неопределенности своих исходных наборов данных, которые могут быть связаны с ошибками измерений или датчиков или с недостаточным разрешением для получения интересующего дескриптора (например, использование грубой цифровой модели рельефа для получения плотности сети рек). Хотя такие неопределенности трудно количественно оценить, есть достаточные доказательства, особенно из различий между различными цифровыми моделями рельефа ([Hawker et al., 2018](#)), полученными водосборными площадями ([Addor et al., 2017](#)) и наборами данных гидрометеорологических переменных ([Peña-Guerrero et al., 2022](#)), что они могут быть значительными.

Например, глобальные продукты осадков имеют значительные расхождения из-за **различий в методе их**

измерения/генерации (спутниковый, повторный анализ или гибридный; [Beck et al., 2019](#)). Национальные и региональные продукты, основанные на измерениях или радары, несмотря на то, что считаются более точными, чем наборы данных дистанционного зондирования или повторного анализа, связаны с большими неопределенностями измерений из-за недобора, вызванного ветром, в измерениях датчиков ([Adam and Lettenmaier, 2003](#) ; [Rasmussen et al., 2012](#)), недооценки количества осадков радаром ([Haberlandt, 2007](#) ; [Rabiei and Haberlandt, 2015](#)) и неопределенности интерполяции ([Berndt and Haberlandt, 2018](#)). Эти неопределенности неизбежно будут транслироваться в агрегированные дескрипторы водосбора (например, среднегодовое количество осадков или испарение, [рис. 12](#)), что, в свою очередь, может существенно повлиять на выводы исследований характеристик водного баланса, направленных, например, на определение межводосборного потока грунтовых вод ([Гордон и др., 2022](#)).



1. [Загрузить: Загрузить изображение в высоком разрешении \(576 КБ\)](#)
2. [Скачать : Загрузить полноразмерное изображение](#)

Рис. 12. Неопределенность **исходных геопространственных наборов данных — отсутствующий компонент анализа неопределенности в характеристике водосбора**. Разница в классификации водосборов как импортеров/экспортеров подземных вод в разных регионах США с использованием гидрометеорологической информации из трех разных источников данных (набор данных A: NLDAS; набор данных B: среднее по ансамблю NLDAS, PRISM и Daymet для осадков и среднее по ансамблю MOD-16, NCA-LDAS и SSEBor для испарения; набор данных C: тройное расположение). Вставки представляют распределения закрытия водного баланса по водосборам с использованием трех разных источников данных. Этот пример иллюстрирует распространение неопределенности исходных наборов данных, которые используются для получения дескрипторов водосбора (т. е. среднегодовых осадков и испарения), на классификацию водосбора: при использовании набора данных B ни один из исследуемых водосборов не классифицируется как экспортер подземных вод, тогда как при использовании набора данных C почти половина всех водосборов классифицируется как экспортер подземных вод. Из Гордона и др. (2022), CC-BY.

Разрешение **исходных источников данных** также может способствовать неопределенности агрегированных дескрипторов

водосбора. Это особенно очевидно на примере цифровых моделей рельефа. Повышение пространственного разрешения цифровой модели рельефа повышает точность разграниченных сетей потоков ([Yang et al., 2014](#)) и, соответственно, имеет первостепенное значение для точного разграничения топографических и геоморфологических свойств водосбора ([Zhang and Montgomery, 1994](#) ; [Wolock and Price, 1994](#)). Несмотря на недавние достижения, данные LiDAR высокого разрешения для создания цифровых моделей рельефа по-прежнему доступны только для 0,005% поверхности суши Земли ([Hawker et al., 2018](#)), что свидетельствует о том, что неопределенности дескрипторов водосбора, связанные с разрешением исходных продуктов, остаются высокими. Поэтому целесообразно исследовать, какие характеристики и какие среды менее чувствительны к различиям в разрешении исходных наборов данных ([Чаван и Шринивас, 2015](#)), или явно учитывать зависимость дескрипторов водосбора от масштаба.

Дескрипторы, агрегированные из **производных наборов данных** (например, гидравлические свойства почвы), могут быть затронуты соответствующими распространяющимися неопределенностями. Это особенно касается свойств подповерхности. С появлением цифрового картирования почв исторические карты типов почв на основе полигонов были преобразованы в производные сеточные наборы данных свойств почвы (например, содержание ила или песка, доступная влагоемкость; [Minasny и McBratney, 2016](#)) с помощью прогностических моделей, основанных на различных переменных окружающей среды (или базовых картах, таких как топографические и карты растительности; [McBratney и др., 2003](#)). Из-за переменной точности этих моделей в пространстве конечные продукты свойств подповерхности связаны с **пространственно изменчивыми неопределенностями** ([Miller и Schaetzl, 2014](#) ; [Stumpf и др., 2017](#)). Эти присущие неопределенности и пространственные различия в качестве геопространственных продуктов могут привести к переменной релевантности для вывода гидрологических процессов в разных регионах. Например, набор данных о почвах HOST, разработанный [Бурманом и др. \(1995\)](#) для Великобритании, который классифицирует почвы на основе доминирующих путей потока, оказался незаменимым для гидрологического районирования в Великобритании (например, UK Flood Estimation Handbook; [Capell et al., 2012](#) ; [McIntyre et al., 2005](#)). Однако применение аналогичной процедуры для гидрологической классификации европейских почв ([Schneider et al., 2007](#)) привело к худшим результатам для прогнозирования базисного стока во Франции ([Oudin et al., 2010](#)), что указывает на потенциально **ограниченную переносимость методов вывода** в разных регионах, особенно для свойств подземных вод. Это важный вопрос для развития крупномасштабной гидрологии и разработки согласованных глобальных наборов данных дескрипторов водосборов, таких как BasinATLAS ([Linke et](#)

al., 2019) и CARAVAN (Kratzert et al., 2023). Несмотря на несомненную полезность этих крупных согласованных наборов данных, значительный объем соответствующей региональной информации может не быть передан, если ее нельзя будет легко количественно оценить (Gnann et al., 2021 ; Floriancic et al., 2022).

Также важно отметить, что **взаимодействие между масштабом и неопределенностью** может быть важным вопросом для получения надежных дескрипторов водосбора (Seyfried and Wilcox, 1995). В более крупных масштабах мелкомасштабная изменчивость и эффекты могут быть включены в возникающие неопределенности, приводящие к разрозненным отчетам о полезности определенных характеристик для понимания реакции водосбора (Wilcox et al., 2006). Поэтому важно определить шкалы, подходящие для различных дескрипторов водосбора и сложности их агрегации.

4.4.2 Произвольный выбор дескрипторов водосбора

Наш обзор показал, что в большинстве случаев полезность дескрипторов водосбора для исследуемой проблемы оценивается с использованием двумерных корреляций, в то время как перекрестная проверка вне выборки встречается редко. Ssegane et al. (2012b) показали, что использование различных статистических и основанных на машинном обучении методов для **выбора переменных** может привести к получению различных подмножеств дескрипторов, которые считаются необходимыми для характеристики гидрологического водосбора, в то время как эффективность этих подвыборок для задач регионализации может значительно различаться при перекрестной проверке (Di Prinzio et al., 2011 ; Tarasova et al., 2018).

Мы выделяем две общие стратегии, которые присутствуют в проанализированных нами исследованиях: 1) выбор исчерпывающего списка дескрипторов и применение количественного отбора признаков с использованием статистических методов или 2) выбор нескольких дескрипторов, которые считаются возможными драйверами на основе предыдущего опыта или литературы (что, однако, часто не указывается явно). Оба подхода имеют недостатки. В первом случае необходимо решить проблему высокой корреляции между дескрипторами водосбора, которая может быть связана с совместной эволюцией климатических и ландшафтных дескрипторов (Merz et al., 2020a ; Ebeling et al., 2021). Во втором случае существует риск априори исключить ключевой драйвер(ы). Оба подхода могут быть затронуты ложными (т. е. не причинно-следственными) корреляциями, что приводит к ошибочным выводам и ограниченной переносимости результатов. Потенциальным решением может быть использование **перцептивных моделей** (Beven and Chappell, 2021 ; McMillan et al., 2023) для облегчения **выбора** дескрипторов водосбора на основе гипотез, которые следует дополнительно **количественно проверить с использованием подходов перекрестной проверки** в сочетании с **несколькими**

подходами к выбору переменных для смягчения потенциальных эффектов мультиколлинеарности. Использование перцептивных моделей делает выбор дескриптора явным и может помочь выявить основные источники эпистемической неопределенности, т. е. текущие пробелы в знаниях ([Wagener et al., 2021](#)). Это, в свою очередь, помогает направлять наши усилия по получению новой информации или исследовать альтернативные источники данных для характеристики особенно неопределенных отсеков водосбора (например, включая знания экспертов-геологов о подземном хранилище, [Rogger et al., 2012](#) ; использование данных о карстовых воронках для определения степени вторичной проницаемости, [Gnann et al., 2021](#)).

5. Резюме и перспективы

Наш систематический обзор выявил текущие практики и пролил свет на существующие предубеждения в характеристике водосбора. Мы показываем, что исследования характеристик водосбора непропорционально сосредоточены на странах Глобального Севера с преимущественно влажной и умеренной средой. Дескрипторы, полученные из источников данных о поверхности земли (т. е. цифровых моделей рельефа, карт землепользования и гидрометеорологических наборов данных), используются гораздо чаще для характеристики водосбора, чем подповерхностные свойства, независимо от области исследования или типа исследования. Временная изменчивость таких дескрипторов часто учитывается, в то время как пространственная и вертикальная изменчивость обычно игнорируются, когда используются методы сосредоточенной агрегации (т. е. пространственные или вертикальные средние). Полезность дескрипторов водосбора часто оценивается с точки зрения их объяснительной силы, в то время как неопределенность дескрипторов (происходящих либо из исходных наборов данных, либо из методов агрегации) почти никогда не учитывается. Предыдущие исследования постулировали **отсутствие гидрологических информативных дескрипторов водосбора** ([Oudin et al., 2010](#) ; [Merz et al., 2020a](#)), подразумевая, что физико-географическое сходство, зафиксированное традиционными дескрипторами, не всегда отражает гидрологическое сходство (т. е. то, как водосборы разделяют, хранят и высвобождают воду и водные компоненты). Этот недостаток информационного содержания может быть связан с предубеждениями в нашей текущей практике, которые мы выявили: отсутствие соответствующих дескрипторов для **засушливых сред и недр** в целом, **пренебрежение дифференцированными** методами агрегации дескрипторов водосбора и **неотъемлемые неопределенности**, связанные с исходными наборами данных. Эти выявленные предубеждения, неопределенности и отсутствующие компоненты характеристики водосбора могут усугубить расхождения между экспериментальными и сравнительными (большая выборка) исследованиями, затрудняя синтез критических зонных процессов и в

конечном итоге препятствуя разработке новых рабочих гипотез и новых гидрологических теорий.

Поэтому будущие исследования по характеристике водосбора должны быть более интенсивно сосредоточены на **сухих средах**, где данные из мелкомасштабных исследований указывают на значительные различия в процессах генерации стока по сравнению с более влажными средами, таким образом, предполагая необходимость в **другом наборе**

дескрипторов водосбора для их характеристики. Не рекомендуется сосредотачиваться только на дескрипторах, которые в настоящее время рассматриваются в существующих наборах данных больших выборок, поскольку они, как правило, смещены в сторону отражения гидрологии более влажных сред. Модели растительности, поверхностный покров, наличие почвенных корок, возраст пустынного покрытия, а также текстура русла реки и пространственная изменчивость осадков являются аспектами, которые следует учитывать при получении наборов данных для исследований гидрологии больших выборок в сухих средах.

Больше усилий следует вложить в создание высококачественных региональных наборов данных о **свойствах недр** для характеристики водосбора. В частности, включение информации о геоморфологической обстановке, наличии рыхлого материала, толщине реголита и выветренной коренной породы может иметь решающее значение для комплексной характеристики водосбора и определения гидрологического сходства. Более того, более инновационные косвенные методы для вывода информации о вторичной проницаемости, такой как количество карстовых воронок или карстовых источников ([Gnann et al., 2021](#)), или использование метаданных наборов данных скважин подземных вод и гидрогеологических отчетов местных и региональных органов власти, которые предоставляют подробную информацию о характеристиках коренной породы, могут быть очень полезными. Дальнейшая разработка и корректировка существующих функций педопереноса с учетом эффектов растительности и структуры почвы ([Or, 2020](#)) может стать еще одним важным достижением для предоставления более надежной информации о гидравлических свойствах почвы в более крупных масштабах. Глобальные коллекции существующих концептуализаций систем подземных вод, вероятно, предоставят дополнительную информацию, которая пока не является широко доступной ([Zipper et al., 2023](#)).

Хотя включение информации о **вертикальной организации**, особенно о подповерхностной слоистости, может быть затруднено доступностью данных, рассмотрение **пространственной организации** особенностей в пределах водосборов может быть улучшено путем разработки новых методов, которые учитывают эти аспекты. Мы показали несколько примеров того, как расстояние до выхода или ближайшего дренажа, а также рассмотрение организации речной сети может быть первым шагом в этом направлении.

Более того, изучение различных стратегий, таких как **составные дескрипторы водосбора** , предложенные [Флорианчиком и др. \(2022\)](#), или получение **функциональных дескрипторов водосбора** ([Янссен и Амели, 2021](#)) для получения более полной и гидрологически релевантной характеристики водосбора может быть еще одним потенциальным путем. Как правило, более **ориентированный на гипотезы выбор дескрипторов водосбора** , подкрепленный перцептивными моделями ([Макмиллан и др., 2023](#)), вместе с тщательным рассмотрением потенциальной **неопределенности в исходных источниках данных** (Аддор и др., 2020) рекомендуется для ограничения субъективности выбора дескриптора и неопределенности. Тестирование различных **методов выбора переменных** ([Ссеган и др., 2012b](#)) и более надежная оценка полезности дескриптора, особенно в исследованиях с большой выборкой, где возможна **перекрестная проверка** , могут быть еще одним способом обеспечения оптимального выбора дескрипторов и их прогностического потенциала для передачи информации между водосборами.

Наконец, стоит отметить, что **отсутствие единой терминологии** для дескрипторов водосбора, представляющих одну и ту же физическую характеристику, или отсутствие подробного определения реализованных дескрипторов серьезно влияет на накопление знаний. Например, с одной стороны, мы столкнулись с несколькими терминами, такими как «коэффициент формы», «фактор формы», «коэффициент удлинения», все из которых относятся к одной и той же особенности, но с другой стороны, мы также столкнулись с тремя разными определениями, все из которых называются «коэффициент формы», в то время как половина исследований, в которых используется этот термин, вообще не дают никакого определения (см. Таблицу S2). Эта неоднозначность ограничивает синтез результатов разных исследований ([McMillan, 2022](#)). Как предполагают [Wagner et al. \(2021\)](#) и [Stein et al. \(2022\)](#) , предоставление четкого описания и метода агрегации для дескрипторов водосбора, предпочтительно в табличной форме, вместе с метаданными/моделями восприятия об исследуемых водосборах может помочь консолидировать ценную информацию, доступную из местных и региональных исследований, которая в настоящее время отсутствует в глобальном масштабе. Это может быть особенно важно для характеристики подземного водосбора, где разрешение и точность глобальных источников данных не позволяют нам охватить обширную подземную неоднородность и сложную вертикальную структуру критической зоны.

Декларация о конфликте интересов

Авторы заявляют о следующих финансовых интересах/личных отношениях, которые могут рассматриваться как потенциально конкурирующие интересы:

Лариса Тарасова сообщает, что финансовая поддержка и дорожные расходы были предоставлены Немецким исследовательским фондом. Лариса Тарасова сообщает, что финансовая поддержка, административная поддержка, расходы на публикацию статей и дорожные расходы были предоставлены Центром исследований окружающей среды имени Гельмгольца (UFZ) . Торстен Вагенер сообщает, что финансовая поддержка была предоставлена Фондом Александра фон Гумбольдта . Себастьян Гнанн сообщает, что финансовая поддержка была предоставлена Фондом Александра фон Гумбольдта .

Благодарности

Мы благодарны библиотекам Колумбийского университета за предоставление доступа к научным статьям, проанализированным в этом обзоре. Мы благодарим Робина Шарсixa за помощь в предварительном отборе научных статей, использованных в анализе. LT выражает признательность Немецкому исследовательскому фонду (Deutsche Forschungsgemeinschaft - DFG) за финансовую поддержку исследовательского подразделения «Пространственно-временная динамика экстремальных наводнений» [FOR2416](#) и Центру исследований окружающей среды имени Гельмгольца (UFZ) . Поддержка SG и TW была предоставлена Фондом Александра фон Гумбольдта в рамках профессорской стипендии Александра фон Гумбольдта , учрежденной Федеральным министерством образования и исследований Германии . Мы благодарим четырех рецензентов за их полезные комментарии.

Приложение А. Дополнительные данные

Загрузите все дополнительные файлы, включенные в эту статью

Что это?

[Загрузить : Загрузить документ Word \(4 МБ\)](#)

Дополнительный материал 1

[Загрузить: Загрузить электронную таблицу \(2 МБ\)](#)

Дополнительный материал 2

[Загрузить : Загрузить электронную таблицу \(216 КБ\)](#)

Дополнительный материал 3

Наличие данных

Метаданные всех извлеченных статей, включая флаги в соответствии с критериями отбора PRISMA для анализа, приведены в таблице S1 вспомогательной информации. Подробные метаданные, включая отнесение к области исследования, количество проанализированных водосборов и характеристик, а также соответствующим образом проиндексированный список всех характеристик водосборов, организованных по основным источникам данных, приведены в таблице S2 вспомогательной информации. Данные о валовом внутреннем продукте за 2019 год получены из Всемирного

банка: <https://databank.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD/1ff4a498/Popular-Indicators>

Рекомендации

1. [Абрахамс и Парсонс, 1991 г.](#)

А.Д. Абрахамс , А.Дж. Парсонс

Связь между инфильтрацией и каменным покровом на полусухом склоне холма, южная Аризона

Дж. Гидрол. , 122 (1-4) (1991) , стр. 49 - 59 ,[10.1016/0022-1694\(91\)90171-Д](#)

[Посмотреть PDF-файл](#)[Посмотреть статью](#)[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

2. [Адам и Леттенмайер, 2003 г.](#)

JS Адам , DP Леттенмайер

Корректировка глобальных сеточных осадков с учетом систематического смещения

108(май)

(2003) , стр . 1-15 ,[10.1029/2002JD002499](#)

[View at publisher](#)

[Google Scholar](#)

3. [Аддор и др., 2017](#)

Н. Аддор , А. Дж. Ньюман , Н. Мизуками , М. П. Кларк

Набор данных CAMELS: характеристики водосбора и метеорология для исследований с большими выборками

Гидрол. Систем Земли , 21 (10) (2017) , стр. 5293 - 5313 ,[10.5194/gecc-21-5293-2017](#)

[View at publisher](#)

[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

4. [Аддор и др., 2020 г.](#)

Н. Аддор , Х. К. До , К. Альварес-Гарретон , Г. Коксон , К. Фаулер , П. А. Мендоса

Гидрология больших выборок: последние достижения, рекомендации по новым наборам данных и масштабные проблемы

Гидрол. Науки. Дж. , 65 (5) (2020) , стр . 712-725 ,[10.1080/02626667.2019.1683182](#)

[View at publisher](#)

This article is free to access.

[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

5. [Альварес-Гарретон и др., 2018 г.](#)

C. Alvarez-Garreton , PA Mendoza , J. Pablo
Boisier , N. Addor , M. Galleguillos , M. Zambrano-Bigiarini , A. Ayala
Набор данных CAMELS-CL: Атрибуты водосбора и метеорология для
исследований больших выборок — набор данных Чили
Гидрол. Систем Земли , 22 (11) (2018) ,
стр. 5817 - 5846 ,[10.5194/hess-22-5817-2018](https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018)

[View at publisher](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

6. Бакалович, 2005

М. Бакалович

Карстовые грунтовые воды: вызов новым ресурсам

Гидрогеол. Ж. , 13 (1) (2005) , стр . 148-160 ,[10.1007/s10040-004-0402-9](https://doi.org/10.1007/s10040-004-0402-9)

[View at publisher](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

7. Бассо и др., 2023 г.

С. Бассо , Р. Мерц , Л. Тарасова , А. Миниусси

Экстремальные наводнения, контролируемые организацией сети рек и
режимом течения

Nat. Geosci. , 16 (4) (2023) , стр . 339-343 ,[10.1038/c41561-023-01155-ж](https://doi.org/10.1038/c41561-023-01155-ж)

[View at publisher](#)

This article is free to access.

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

8. Бек и др., 2018

NE Beck , NE Zimmermann , TR McVicar , N. Vergopolan , A. Berg , EF Wood

Текущие и будущие карты классификации климата Кеппен-Гейгера с
разрешением 1 км

Научные данные , 5 (2018) , стр . 1-12 ,[10.1038/sdata.2018.214](https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214)

[View at publisher](#)

This article is free to access.

[Google Scholar](#)

9. Бек и др., 2019

NE Beck , M. Pan , T. Roy , GP Weedon , F. Pappenberger , AIJM Van
Dijk , ... , EF Wood

Ежедневная оценка 26 наборов данных об осадках с использованием данных
радаров-измерителей уровня IV для CONUS

Гидрол. Систем Земли , 23 (1) (2019) , стр. 207 - 224 ,[10.5194/hess-23-207-2019](https://doi.org/10.5194/hess-23-207-2019)

[View at publisher](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

10. [Беккер и др., 2018](#)

Р. Беккер , М. Гебремихаэль , М. Мэркер

Влияние поверхностных и подповерхностных свойств почвы на водопроницаемость насыщенной почвы в полужасушливом экспериментальном водоразделе Орехового ущелья, Аризона, США
Геодерма , 322 (2018) , стр . 112-120 , [10.1016/j.geoderma.2018.02.023](#)

[Посмотреть PDF-файл](#)[Просмотреть статью](#)[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

11. [Белаксен и др., 2017](#)

И. Белаксен , Ф. Марра , Н. Пелег , Э. Морин

Конвективные осадки в сухом климате: связь с синоптическими системами и возникновением внезапных наводнений в районе Мертвого моря
Гидрол. Систем Земли , 21 (10) (2017) , стр. 5165 - 5180 , [10.5194/гесс-21-5165-2017](#)

[View at publisher](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

12. [Бенсон и др., 1973](#)

МА Бенсон , RW Картер , RCB Мортон , VE Маккелви

Национальное исследование программы сбора данных о речном стоке (1973)

[Google Scholar](#)

13. [Берндт и Хаберландт, 2018](#)

К. Берндт , У. Хаберландт

Пространственная интерполяция климатических переменных в Северной Германии — влияние временного разрешения и плотности сети
J. Гидрология: Региональные исследования , 15 (2018) , стр. 184 - 202 , [10.1016/j.ejrh.2018.02.002](#)

[Посмотреть PDF-файл](#)[Просмотреть статью](#)[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

14. [Бевен и Чаппелл, 2021 г.](#)

К. Дж. Бевен , Н. А. Чаппелл

Перцептивная озадаченность и экономия параметров
Wiley Interdiscip. Rev. Water , 8 (4) (2021) , стр . 1-17 , [10.1002/ват2.1530](#)

[View at publisher](#)

[Google Scholar](#)

15. [Блэшль и др., 2013](#)

G. Blöschl , M. Sivapalan , T. Wagener , A. Viglione , H. Savenije (ред.) , Прогнозирование стока в неизмеренных бассейнах: синтез по процессам, местам и масштабам , Cambridge Univ. Press , N. Y (2013)
[Google Scholar](#)

16. [Бонетти и др., 2021 г.](#)

С. Бонетти , З. Вэй , Д. Ор
Структура для количественной оценки гидрологических эффектов
структуры почвы в различных масштабах
Коммуникация Земля и Окружающая
среда , 2 (1) (2021) , [10.1038/s43247-021-00180-0](#)
[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

17. [Бурман и др., 1995](#)

DB Boorman , JM Hollis , A. Lilly
Гидрология типов почв: классификация почв Соединенного Королевства на
основе гидрологии
Институт гидрологии. Получено из
<http://nora.nerc.ac.uk/7369/> (1995)
[Google Scholar](#)

18. [Бёркер и др., 2018 г.](#)

Й. Бёркер , Й. Хартманн , Т. Аманн , Г. Ромеро-Муджалли
Наземные отложения Земли: Разработка глобальной базы данных карт
неконсолидированных отложений (ГУМ)
Геохимия, геофизика, геосистема , 19 (4) (2018) ,
стр. 997 - 1024 , [10.1002/2017GC007273](#)
[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

19. [Колдуэлл и др., 2012](#)

TG Колдуэлл , МН Янг , EV Макдональд , J. Zhu
Неоднородность почвы в кустарниковых зонах пустыни Мохава:
биотические и абиотические процессы
Водные ресурсы. Рез. , 48 (9) (2012) , [10.1029/2012WR011963](#)
[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

20. [Капелл и др., 2012](#)

Р. Капелл , Д. Тецлафф , А. Дж. Хартли , К. Соулсби

Связь показателей гидрологической функции и времени транзита с ландшафтным контролем в неоднородном мезомасштабном водосборе
Гидрол. Процесс. , 26 (3) (2012) , стр. 405 - 420 ,[10.1002/гип.8139](#)
[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

21. [Сеола и др., 2014](#)

С. Чеола , Ф. Лайо , А. Монтанари

Ночные огни со спутников показывают растущую подверженность людей наводнениям во всем мире

Geophys. Res. Lett. , 41 (20) (2014) ,
стр. 7184 - 7190 ,[10.1002/2014GL061859](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

22. [Шагас и др., 2020 г.](#)

VBP Chagas , LB Chaffe , P., Addor, N., M. Fan, F., S. Fleischmann, A., CD Paiva, R., & Siqueira, VA

CAMELS-BR: Гидрометеорологические временные ряды и ландшафтные атрибуты для 897 водосборов в Бразилии

Данные по науке о системе Земли , 12 (3) (2020) , стр . 2075–2096 ,[10.5194/essd-12-2075-2020](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

23. [Чаван и Шринивас, 2015 г.](#)

С.Р. Чаван , В.В. Шринивас

Влияние источника ЦМР на эквивалентное отношение Хортон-Штралера на основе GIUH для водосборов в двух речных бассейнах Индии

J. Hydrol. , 528 (2015) , стр . 463-489 ,[10.1016/j.jhydrol.2015.06.049](#)

[Посмотреть PDF-файл](#)[Просмотреть статью](#)[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

24. [Чо и др., 2017](#)

А. Чо , А. Фишер , М. Дойл , М. Леви , П. Ким-Бланко , Р. Уэбб

Ценность информации о воде: преодоление глобальной нехватки данных

Белая книга. Нью-Йорк, Xylem Inc., Рай-Брук

[xylem.com/waterdata](#) (2017)

[Google Scholar](#)

25. [Кондон и др., 2020 г.](#)

LE Condon , KH Markovich , CA Kelleher , JJ McDonnell , G. Ferguson , JC McIntosh

Где находится дно водораздела?

Водные ресурсы. Рез. , 56 (3) (2020) , [10.1029/2019WR026010](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

26. [Коксон и др., 2020 г.](#)

Г. Коксон , Н. Эддор , Дж.

П. Блумфилд , Дж. Фрир , М. Фрай , Дж. Ханнафорд , ... , Р. Вудс

CAMELS-GB: гидрометеорологические временные ряды и ландшафтные атрибуты для 671 водосбора в Великобритании

Данные по науке о системе Земли , 12 (4) (2020) , стр. 2459–2483 , [10.5194/essd-12-2459-2020](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

27. [Ди Принцио и др., 2011](#)

М. Ди Принцио , А. Кастелларин , Э. Тот

Классификация водосбора на основе данных: применение к проблеме паба

Гидрол. Систем Земли , 15 (6) (2011) ,

стр. 1921 - 1935 , [10.5194/гесс-15-1921-2011](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

28. [Данн и др., 2011](#)

WC Dunn , BT Milne , R. Mantilla , VK Gupta

Масштабные соотношения между прибрежной растительностью и порядком течения в сети реки Уайтуотер, Канзас, США

Landsc. Ecol. , 26 (7) (2011) , стр. 983 - 997 , [10.1007/s10980-011-9622-2](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

29. [Данн, 1978 г.](#)

Т. Данн

Полевые исследования процессов течения на склонах холмов

MJ Kirkby (ред.) , Hillslope Hydrology , John Wiley & Sons , Чичестер, Великобритания (1978) , стр. 227 - 293

[Google Scholar](#)

30. [Эбелинг и др., 2021 г.](#)

П. Эбелинг , Р. Кумар , М. Вебер , Л. Кнолл , Дж.

Х. Флекенштейн , А. Мусольф

Архетипы и контроль речного экспорта питательных веществ через водосборы Германии

Водные ресурсы. Res. , 57 (4) (2021) , стр . 1-29 ,[10.1029/2020WR028134](https://doi.org/10.1029/2020WR028134)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

31. [Фан, 2019](#)

Ю. Фань

Водосборы протекают? Wiley Interdisciplinary Reviews: Вода

6(6)

(2019) ,[10.1002/WAT2.1386](https://doi.org/10.1002/WAT2.1386)

[Посмотреть у издателя](#)

[Google Scholar](#)

32. [Фанг и др., 2018](#)

Y. Fang , S. Ceola , K. Paik , G. McGrath , PSC Rao , A. Montanari , JW Jawitz

Глобально-универсальная фрактальная модель человеческих поселений в речных сетях

Будущее Земли , 6 (8) (2018) ,

стр. 1134 - 1145 ,[10.1029/2017EF000746](https://doi.org/10.1029/2017EF000746)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

33. [ФАО, 2006 г.](#)

ФАО

Всемирная справочная база данных по почвенным ресурсам — основа для международной классификации, корреляции и коммуникации

Отчеты о мировых почвенных ресурсах 103, Международный союз почвоведов, ISRIC - Всемирная почвенная информация и

Продовольственная и сельскохозяйственная организация

Объединенных Наций, Рим (2006)

[Google Scholar](#)

34. [Фармер и др., 2021 г.](#)

WH Farmer , JE Kiang , TD Feaster , K. Eng

Регионализация статистики поверхностных вод с использованием множественной линейной регрессии

Методы и методы Геологической службы США, раздел А,

Статистический анализ книги 4, Гидрологический анализ и интерпретация (2021)

[Google Scholar](#)

35. [Фатичи и др., 2020 г.](#)

С. Фатичи , Д. Ор , Р. Валко , Х. Вереекен , М. Х. Янг , Т.
А. Геццехей , Р. Ависсар

Структура почвы является важным упущением в моделях земной системы.
Нац. Сообщ. , 11 (1) (2020) , [10.1038/s41467-020-14411-z](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

36. [Флорианчич и др., 2022 г.](#)

MG Floriancic , D. Spies , IHJ van Meerveld , P. Molnar

Многомасштабное исследование доминирующих характеристик водосбора,
влияющих на показатели низкого расхода воды

Гидрол. Процесс. , 36 (1) (2022) , [10.1002/гип.14462](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

37. [Фаулер и др., 2021 г.](#)

KJ Fowler , SC Acharya , N. Addor , C. Chou , MC Peel

CAMELS-AUS: гидрометеорологические временные ряды и ландшафтные
атрибуты для 222 водосборов в Австралии

Данные по науке о системе Земли , 13 (2021) , стр. 3847 - 3867

[Посмотреть у издателя](#)

[CrossRef](#)[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

38. [Фрир и др., 2002](#)

J. Freer , JJ McDonnell , KJ Beven , NE Peters , DA Burns , RP Hooper , ... , C
. Kendall

Роль рельефа коренных пород в подземном ливневом потоке

Водные ресурсы. Рез. , 38 (12) (2002) , [10.1029/2001wr000872](#)

5-1-5-16

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

39. [Фудзимото и др., 2016](#)

М. Фудзимото , Н. Отэ , М. Кавасаки , К. Осака , М. Ито , И. Оцука , М.
Ито

Влияние подземных вод коренных пород на характеристики речного стока в
вулканическом водосборе

Гидрол. Процесс. , 30 (4) (2016) , стр. 558 - 572 , [10.1002/гип.10558](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

40. Ганнон и др., 2014

Дж. П. Гэннон , С. В. Бейли , К. Дж. Макгуайр

Организация режимов грунтовых вод и порогов реагирования по почвам:

основа для понимания формирования стока в верхнем водосборе

Водные ресурсы. Res. , 50 (11) (2014) ,

стр. 8403 - 8419 , [10.1002/2014WR015498](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

41. Гао и др., 2019

Х. Гао , К. Биркель , М. Граховиц , Д. Тецлафф , К. Соулсби , Х. Савен
ье

Простой модуль генерации стока, управляемый топографией и не

требующий калибровки

Гидрол. Системные науки о Земле , 1-42 (2019) , [10.5194/hess-2018-141](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

42. Герке и ван Генухтен, 1993 г.

НН Gerke , МТ van Genuchten

Модель двойной пористости для моделирования преимущественного

движения воды и растворенных веществ в структурированных пористых
средах

Водные ресурсы. Res. , 29 (2) (1993) ,

стр. 305 - 319 , [10.1029/92WR02339](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

43. Гарари и др., 2011

С. Гарари , М. Граховиц , Ф. Феничия , Х. Х. Г. Савление

Гидрологическая ландшафтная классификация: исследование

эффективности ландшафтных классификаций на основе HAND в

центральноевропейском мезомасштабном водосборе

Гидрол. Систем Земли , 15 (11) (2011) ,

стр. 3275 - 3291 , [10.5194/hess-15-3275-2011](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

44. Глейзер и др., 2018 г.

Б. Глейзер , М. Антонелли , М. Чини , Л. Пфистер , Дж. Клаус
Техническое примечание: Картографирование динамики насыщения
поверхности с помощью тепловых инфракрасных изображений
Гидрол. Систем Земли , 22 (11) (2018) ,
стр. 5987 - 6003 , [10.5194/hess-22-5987-2018](https://doi.org/10.5194/hess-22-5987-2018)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

45. [Глисон и др., 2014](#)

Т. Глисон , Н. Моосдорф , Дж. Хартманн , LPH Van Beek
Взгляд под поверхность Земли: карты глобальной гидрогеологии
(GLHYMPS) проницаемости и пористости
Geophys. Res. Lett. , 41 (11) (2014) ,
стр. 3891 - 3898 , [10.1002/2014GL059856](https://doi.org/10.1002/2014GL059856)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

46. [Глисон и др., 2021 г.](#)

T. Gleeson , T. Wagener , P. Döll , SC Zipper , C. West , Y. Wada , MFP Bierkens

Перспектива GMD: стремление улучшить оценку репрезентативности
грунтовых вод в моделях от континентального до глобального масштаба
Geosci. Model Dev. , 14 (12) (2021) , стр. 7545 - 7571 , [10.5194/gmd-14-7545-2021](https://doi.org/10.5194/gmd-14-7545-2021)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

47. [Гнанин и др., 2021 г.](#)

SJ Gnann , HK McMillan , RA Woods , NJK Howden

Включение региональных знаний улучшает прогнозы сигнатуры базисного
потока в больших выборках гидрологии
Водные ресурсы. Res. , 57 (2) (2021) , стр . 1-
22 , [10.1029/2020WR028354](https://doi.org/10.1029/2020WR028354)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

48. [Гнанин и др., 2023 г.](#)

С. Гнанин , Р. Рейнеке , Л. Штайн , Й. Вада , В. Тьерри , Х. Мюллер
Шмид , ... , Т. Вагенер

Функциональные связи выявляют различия в представлении круговорота
воды в глобальных моделях водных ресурсов

Природа Вода , 1 (12) (2023) , стр. 1079 - 1090 ,[10.1038/c44221-023-00160-г](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

49.[Гудрич и др., 1995](#)

DC Goodrich , JM Faurès , DA Woolhiser , LJ Lane , S. Sorooshian
Измерение и анализ изменчивости мелкомасштабных конвективных
штормовых осадков

Дж. Гидрол. , 173 (1-4) (1995) , стр. 283 - 308 ,[10.1016/0022-1694\(95\)02703-P](#)

[Посмотреть PDF-файл](#)[Просмотреть статью](#)[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

50.[Гордон и др., 2022 г.](#)

BL Gordon , WT Crow , AG Konings , DN Dralle , AA Harpold
Можем ли мы использовать водный бюджет для вывода поведения
водосбора на возвышенностях? Роль оценки ошибок набора данных и
межбассейновый поток грунтовых вод

Водные ресурсы. Res. , 58 (9) (2022) , стр . 1-
26 ,[10.1029/2021wr030966](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

51.[Гутман и Смолл, 2007](#)

Э.Д. Гутманн , Э.Э. Смолл
Сравнение гидравлических свойств почвы модели поверхности земли,
оцененных с помощью обратного моделирования и функций педотрансфера
Водные ресурсы. Рез. , 43 (5) (2007) ,[10.1029/2006WR005135](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

52.[Хаберландт, 2007](#)

У. Хаберландт
Геостатистическая интерполяция почасовых данных об осадках, полученных
с помощью дождемеров и радаров, для крупномасштабного экстремального
ливневого события

Дж. Гидрол. , 332 (1-2) (2007) ,
стр. 144 - 157 ,[10.1016/j.jhydrol.2006.06.028](#)

[Посмотреть PDF-файл](#)[Просмотреть статью](#)[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

53. [Хао и др., 2021 г.](#)

Z. Hao , J. Jin , R. Xia , S. Tian , W. Yang , Q. Liu , Y. Zhang

ССАМ: набор данных по атрибутам и метеорологии водосбора Китая
Данные по науке о системе Земли , 13 (12) (2021) , стр. 5591–5616 , [10.5194/essd-13-5591-2021](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

54. [Хартманн и Моосдорф, 2012](#)

Й. Хартманн , Н. Моосдорф

Новая глобальная база данных литологических карт GLiM: отображение свойств горных пород на поверхности Земли

Геохимия, геофизика,

геосистема , 13 (12) (2012) , [10.1029/2012GC004370](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

55. [Хартманн и др., 2015](#)

А. Хартманн , Т. Глисон , Р. Росолем , Ф. Пьянози , Й. Вада , Т. Вагенер

Крупномасштабная имитационная модель для оценки пополнения карстовых грунтовых вод в Европе и Средиземноморье

Geosci. Model Dev. , 8 (6) (2015) , стр. 1729 - 1746 , [10.5194/gmd-8-1729-2015](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

56. [Хартманн и др., 2017](#)

А. Хартманн , Т. Глисон , Й. Вада , Т. Вагенер

Повышение скорости пополнения запасов грунтовых вод и изменение чувствительности пополнения запасов к изменчивости климата из-за неоднородности подземных вод

Proc. Natl. Acad. Sci. USA , 114 (11) (2017) , стр. 2842 - 2847 , [10.1073/pnas.1614941114](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

57. [Хоукер и др., 2018](#)

Л. Хоукер , П. Бейтс , Дж. Нил , Дж. Ружье

Перспективы моделирования цифровой модели рельефа (ЦМР) для моделирования наводнений в условиях отсутствия высокоточной глобальной ЦМР открытого доступа

Фронт. Науки о Земле , 6 (2018) , [10.3389/feart.2018.00233](https://doi.org/10.3389/feart.2018.00233)

[Посмотреть у издателя](#)

[Google Scholar](#)

58. [Хеллвиг и др., 2022 г.](#)

Дж. Хеллвиг , И. Лю , К. Шталь , А. Хартманн

Распространение засухи в пространстве и времени: роль потоков грунтовых вод

Письмо по охране окружающей

среды , 17 (9) (2022) , [10.1088/1748-9326/ac8693](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac8693)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

59. [Хелтон и др., 2018 г.](#)

AM Helton , RO Hall , E. Bertuzzo

Как структура сети может влиять на удаление азота потоками

Freshw. Biol. , 63 (1) (2018) , стр . 128-140 , [10.1111/fwb.12990](https://doi.org/10.1111/fwb.12990)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

60. [Хьюлетт и Хибберт, 1967 г.](#)

Дж. Д. Хьюлетт , А. Р. Хибберт

Факторы, влияющие на реакцию малых водосборов на осадки во влажных районах

WE Sopper , HW Lull (ред .) , Лесная гидрология (1967) , стр. 275-290

Извлекаются из

<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0309133309338118>

[Google Scholar](#)

61. [Хёге и др., 2023 г.](#)

М. Хёге , М. Каузларик , Р. Сибер , У. Шёненбергер , П. Хортон , Й. Шванбек , ... , Ф. Фениция

CAMELS-CH: гидрометеорологические временные ряды и ландшафтные атрибуты для 331 водосбора в гидрологической Швейцарии

Данные по науке о системе Земли , 15 (12) (2023) , стр. 5755-5784 , [10.5194/essd-15-5755-2023](https://doi.org/10.5194/essd-15-5755-2023)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

62. [Хортон, 1932 г.](#)

Р. Э. Хортон

Характеристики водосборного бассейна

EOS Trans . Американского геофизического союза , 13 (1) (1932) ,
стр. 350-361 ,[10.1029/TR013i001p00350](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

63.Хортон, 1945 г.

Р. Э. Хортон

Эрозионное развитие водотоков и их водосборных бассейнов;
гидрофизический подход к количественной морфологии

Бюллетень Геологического общества

Америки , 56 (3) (1945) , стр . 275-370 ,[10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

64.Храховиц и др., 2013

М. Храховиц , Х. Х. Г. Савенье , Г. Блёшль , Дж.

Дж. Макдоннелл , М. Сивапалан , Дж. В. Померой , К. Куденнек

Десятилетие прогнозов в неизмеримых бассейнах (PUB) — обзор

Гидрол. Науки. Дж. , 58 (6) (2013) ,

стр. 1198 - 1255 ,[10.1080/02626667.2013.803183](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

65.Хаскрофт и др., 2018

Дж. Хаскрофт , Т. Глисон , Дж. Хартманн , Дж. Бёркер

Составление и картирование глобальной проницаемости

неконсолидированной и консолидированной Земли: GLobal HYdrogeology

MaPS 2.0 (GLHYMPS 2.0)

Geophys. Res. Lett. , 45 (4) (2018) ,

стр. 1897 - 1904 ,[10.1002/2017GL075860](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

66.Янссен и Амели, 2021 г.

Дж. Янссен , А.А. Амели

Гидрологический функциональный подход к улучшению показателей

крупномасштабных гидрологических наблюдений в регионах с плохим
уровнем наблюдений

Водные ресурсы. Рез. , 57 (9) (2021) ,[10.1029/2021WR030263](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

67. [Джарвис и др., 2013](#)

Н. Джарвис , Дж. Кёстель , И. Мессинг , Дж. Мойс , А. Линдаль
Влияние почвенных, землепользования и климатических факторов на
гидравлическую проводимость почвы

Гидрол. Систем Земли , 17 (12) (2013) ,
стр. 5185 - 5195 , [10.5194/гесс-17-5185-2013](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

68. [Джефферсон и др., 2010](#)

А. Джефферсон , GE Грант , SL Льюис , ST Ланкастер
Коэволюция гидрологии и топографии на базальтовом ландшафте в
Орегонском каскадном хребте, США

Earth Surf. Process. Landf. , 35 (7) (2010) ,
стр. 803 - 816 , [10.1002/особенно 1976](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

69. [Цзян и др., 2023 г.](#)

С. Цзян , Л. Тарасова , Г. Ю , Й. Цшайшлер
Важность комплексных факторов, способствующих возникновению крупных
речных наводнений
(2023)

0–38

[Google Scholar](#)

70. [Кампф и др., 2016](#)

SK Kampf , J. Faulconer , JR Shaw , NA Sutfin , DJ Cooper

Дождевые и русловые стоки добавляются к подземным водам под
гиперзасушливыми эфемерными руслами рек

J. Hydrol. , 536 (2016) , стр. 524 - 533 , [10.1016/j.jhydrol.2016.03.016](#)

[Посмотреть PDF-файл](#)[Просмотреть статью](#)[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

71. [Кампф и др., 2018](#)

SK Kampf , J. Faulconer , JR Shaw , M. Lefsky , JW Wagenbrenner , DJ Cooper

Пороговые значения осадков для формирования стока в пустынных
временных водотоках

Водные ресурсы. Res. , 54 (12) (2018) ,
стр. 9935 - 9950 , [10.1029/2018WR023714](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

72. Канг и др., 2008

С. Канг , Х. Лин , В. Дж. Гбурек , Г. Дж. Фолмар , Б. Лоури

Содержание нитратов в базовом потоке в зависимости от порядка водотока и сельскохозяйственного использования земель

J. Environ. Qual. , 37 (3) (2008) , стр. 808 - 816 , [10.2134/jeq2007.0011](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

73. Кейзер и Хункелер, 2016 г.

Д. Кейзер , Д. Хункелер

Вклад аллювиальных грунтовых вод в сток горных водосборов

Водные ресурсы. Res. , 52 (2) (2016) ,

стр. 680 - 697 , [10.1002/2014WR016730](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

74. Кианг и др., 2013

JE Kiang , DW Stewart , Sa Archfield , EB Osborne , K. Eng

Анализ пробелов в национальной сети речного стока

Научный инвестиционный отчет , 2013-5013 (2013)

[Google Scholar](#)

75. Клинглер и др., 2021 г.

К. Клинглер , К. Шульц , М. Херрнеггер

LamaH-CE: Большие выборки данных по гидрологии и наукам об

окружающей среде для Центральной Европы

Данные по науке о системе Земли , 13 (2021) , стр. 4529 - 4565

[Посмотреть у издателя](#)

[CrossRefПосмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

76. Краббенхофт и др., 2022 г.

SA Krabbenhoft , GH Allen , P. Lin , SE Godsey , DC Allen , RM Burrows , ...
, JD Olden

Оценка смещения размещения глобальной сети речных постов

Nature Sustain. , 5 (7) (2022) , стр. 586 - 592 , [10.1038/s41893-022-00873-0](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

77. Крацерт и др., 2023

Ф. Кратцерт , Г. Ниаринг , Н. Аддор , Т. Эрикссон , М. Гаух , О. Гилон ,
... , Й. Матиас

Caravan — глобальный набор данных сообщества для крупномасштабной
гидрологии

Научные данные , 10 (1) (2023) , [10.1038/s41597-023-01975-j](https://doi.org/10.1038/s41597-023-01975-j)
[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

78. [Леманн и др., 2020 г.](#)

П. Леманн , С. Бикель , З. Вэй , Д. Ор

Физические ограничения для улучшенной оценки гидравлических
параметров почвы с помощью функций педотрансфера

Водные ресурсы. Рез. , 56 (4) (2020) , [10.1029/2019WR025963](https://doi.org/10.1029/2019WR025963)
[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

79. [Леоне и др., 2020 г.](#)

JD Leone , WS Holbrook , CS Riebe , J. Chorover , TPA Ferré , BJ Carr , RP C
allahan

Сильный контроль толщины реголита за счет расслоения коренной породы
Earth Surf. Process. Landf. , 45 (12) (2020) ,
стр. 2998 - 3010 , [10.1002/особенно.4947](https://doi.org/10.1002/особенно.4947)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

80. [Лесшен и др., 2009](#)

JP Lesschen , JM Schoorl , LH Cammeraat

Моделирование стока и эрозии для полувлажного водосбора с
использованием многомасштабного подхода, основанного на
гидрологической связности

Геоморфология , 109 (3-4) (2009) ,
стр. 174 - 183 , [10.1016/j.geomorph.2009.02.030](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.02.030)

[Посмотреть PDF-файл](#)[Посмотреть статью](#)[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

81. [Ли и Амели, 2023 г.](#)

Ли, Х. и Амели, А.А. (2023). Субсидия на подземные воды на склонах гор влияет на
соотношение между хранением и сбросом при низком расходе. Water Resour. Res.,
59(10). doi: <https://doi.org/10.1029/2022WR034155> .

[Google Scholar](#)

82. [Ли и др., 2014](#)

Х. Ли , М. Сивапалан , Ф. Тиан , К. Харман

Функциональный подход к исследованию климатических и ландшафтных факторов, контролирующих формирование стока: 1. Поведенческие ограничения на объем стока

Водные ресурсы. Res. , 50 (12) (2014) ,
стр. 9300 - 9322 ,[10.1002/2014WR016307](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

83. [Линке и др., 2019](#)

С. Линке , Б. Ленер , К. Уэллс

Даллер , Дж. Ариви , Г. Грилл , М. Ананд , ... , М. Тиме

Глобальные гидроэкологические характеристики суббассейна и речного участка с высоким пространственным разрешением

Научные данные , 6 (1) (2019) ,[10.1038/c41597-019-0300-6](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

84. [Лю и др., 2020 г.](#)

Y. Liu , T. Wagener , HE Beck , A. Hartmann

Какова гидрологически эффективная площадь водосбора?

Письмо по охране окружающей

среды , 15 (10) (2020) ,[10.1088/1748-9326/aba7e5](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

85. [Лориц и др., 2019](#)

Р. Лориц , А. Клейдон , К. Якиш , М. Вестхофф , У. Эрет , Х. Гупта , Э. Зеке

Топографический индекс, объясняющий гидрологическое сходство путем учета совместного контроля формирования стока.

Гидрол. Систем Земли , 23 (9) (2019) ,

стр. 3807 - 3821 ,[10.5194/hess-23-3807-2019](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

86. [Лутц и др., 2020 г.](#)

SR Lutz , N. Trauth , A. Musolff , BM Van

Breukelen , K. Knöller , JH Fleckenstein

Насколько важна денитрификация в прибрежных зонах? Объединение смешивания конечных членов и изотопного моделирования для

количественной оценки удаления нитратов из прибрежных грунтовых вод

Водные ресурсы. Рез. , 56 (1) (2020) , [10.1029/2019wr025528](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

87. [Марани и др., 1994](#)

М. Марани , А. Ринальдо , Р. Ригон , И. Родригес-Итурбе

Геоморфологические функции ширины и случайный каскад

Geophys. Res. Lett. , 21 (19) (1994) ,

стр. 2123 - 2126 , [10.1029/94GL01933](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

88. [Марчамало и др., 2016](#)

М. Марчамало , Дж. М. Хук , П. Дж. Сандеркок

Связность потоков и отложений в полувзасушливых ландшафтах юго-восточной Испании: закономерности и контроль

Деградация земель. Развитие , 27 (4) (2016) ,

стр. 1032 - 1044 , [10.1002/лдр.2352](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

89. [МакБратни и др., 2003 г.](#)

AB McBratney , ML Mendonça , B. Minasny

О цифровом картографировании почв

Геодерма , 117 (2003) , стр . 3-52

[Посмотреть PDF-файл](#)[Просмотреть статью](#)[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

90. [Маккормик и др., 2021 г.](#)

EL McCormick , DN Dralle , WJ Hahm , AK Tune , LM Schmidt , KD Chadwick , DM Remp

Широко распространенное использование древесными растениями воды, хранящейся в горных породах

Природа , 597 (7875) (2021) , стр . 225-229 , [10.1038/s41586-021-03761-3](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

91. [Макфадден и др., 1987](#)

Л. Д. Макфадден , С. Г. Уэллс , М. Дж. Джерцинович

Влияние эоловых и педогенных процессов на происхождение и эволюцию пустынных мостовых

Геология , 15 (6) (1987) , стр . 504-508 ,[10.1130/0091-7613\(1987\)15<504:IOEAPP>2.0.CO;2](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Google Scholar](#)

92.[Макинтайр и др., 2005](#)

Н. Макинтайр , Х. Ли , Х. Уитер , А. Янг , Т. Вагенер
Ансамблевые прогнозы стока в неучтенных водосборах
Водные ресурсы. Res. , 41 (12) (2005) , стр . 1-14 ,[10.1029/2005WR004289](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

93.[Макмиллан, 2020](#)

Х. Макмиллан

Связь гидрологических сигнатур с гидрологическими процессами: обзор
Гидрол. Процесс. , 34 (6) (2020) ,
стр. 1393 - 1409 ,[10.1002/гип.13632](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

94.[Макмиллан, 2022 г.](#)

Х. Макмиллан

Таксономия гидрологических процессов и функции водосбора
Гидрол. Процесс. , 36 (3) (2022) ,[10.1002/гип.14537](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

95.[Макмиллан и др., 2023 г.](#)

Х. Макмиллан , Р. Араки , С. Гнанн , Р. Вудс , Т. Вагенер

Как гидрологи воспринимают водоразделы? Обзор и анализ перцептивных
модельных фигур для экспериментальных водоразделов

Гидрол. Процесс. , 37 (3) (2023) ,[10.1002/гип.14845](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

96.[Медоуз и др., 2008](#)

DG Meadows , MH Young , EV McDonald

Влияние относительного возраста поверхности на гидравлические свойства
и инфильтрацию почв, связанных с пустынными мостовыми

Катена , 72 (1) (2008) , стр . 169-178 ,[10.1016/j.catena.2007.05.009](#)

[Посмотреть PDF-файл](#)[Просмотреть статью](#)[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

97. [Мерц и др., 2020a](#)

Р. Мерц , Л. Тарасова , С. Бассо

Управление параметрами распределенных моделей водосбора — сколько информации содержится в обычных дескрипторах водосбора?

Водные ресурсы. Рез. , 56 (2) (2020) , [10.1029/2019WR026008](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

98. [Мерц и др., 2020b](#)

Р. Мерц , Л. Тарасова , С. Бассо

Кулинарная книга о наводнениях: ингредиенты и региональные вкусы наводнений в Германии

Письмо по охране окружающей среды , 15 (11) (2020) ,

Статья 114024 , [10.1088/1748-9326/abb9dd](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

99. [Мессаджер и др., 2021 г.](#)

М.

Л. Мессаджер , Б. Ленер , К. Кокберн , Н. Ламуру , Х. Пелла , Т. Снелдер , ... , Т. Датри

Распространенность непостоянных рек и ручьев в мире

Природа , 594 (7863) (2021) , стр . 391-397 , [10.1038/c41586-021-03565-5](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

100. [Миддлтон и Стернберг, 2013 г.](#)

Нью-Джерси Миддлтон , Т. Стернберг

Климатические опасности в засушливых районах: обзор

Earth Sci. Rev. , 126 (2013) , стр . 48-

57 , [10.1016/j.earscirev.2013.07.008](#)

[Посмотреть PDF-файл](#)[Просмотреть статью](#)[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

101. [Миллер и Шетцль, 2014 г.](#)

Б.А. Миллер , Р.Дж. Шетцль

Историческая роль базовых карт в географии почв

Геодерма , 230-231 (2014) ,

стр. 329 - 339 , [10.1016/j.geoderma.2014.04.020](#)

[Посмотреть PDF-файл](#)[Просмотреть статью](#)[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

102. [Минасны и МакБратни, 2016 г.](#)

Б. Минасны , А. Б. МакБратни

Цифровое картирование почв: краткая история и некоторые уроки

Геодерма , 264 (2016) , стр . 301-311 , [10.1016/](#)

[j.geoderma.2015.07.017](#)

[Посмотреть PDF-файл](#)[Просмотреть статью](#)[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

103. [Мино и др., 2015](#)

М. М. Мино , В. М. Воллхейм , Р. Дж. Стюарт

Удаление и экспорт питательных веществ

Geophys. Res. Lett. , 42 (2015) ,

стр. 6688 - 6695 , [10.1002/2015GL064965](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

104. [Мишра и Сингх, 2003 г.](#)

SK Mishra , VP Singh

Методология номера кривой Службы сохранения почв (SCS-CN)
(2003) , [10.1007/978-94-017-0147-1](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Google Scholar](#)

105. [Миямото и др., 2011](#)

Х. Миямото , Т. Хашимото , К. Митиоку

Распределение землепользования и численности населения по всему

бассейну: моделирование порядка рек и классификация речных бассейнов в
Японии

Управление окружающей средой , 47 (5) (2011) ,

стр. 885 - 898 , [10.1007/s00267-011-9653-0](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

106. [Морин и др., 2006](#)

Э. Морин , Д.С. Гудрич , Р.А. Мэддокс , Х. Гао , Х.В. Гупта , С. Сорушян

Пространственные закономерности в явлениях грозových осадков и их связь
с гидрологической реакцией водораздела

Adv. Water Resour. , 29 (6) (2006) ,

стр. 843 - 860 , [10.1016/j.advwatres.2005.07.014](#)

[Посмотреть PDF-файл](#)[Просмотреть статью](#)[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

107. [Мусса, 2008 г.](#)

Р. Мусса

Что управляет формой функции ширины и можно ли ее использовать для сравнения и регионализации сетей каналов?

Водные ресурсы. Рез. , 44 (8) (2008) , [10.1029/2007WR006118](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

108. [Малро и др., 2023 г.](#)

Б. Малро , С.Б. Шоу , К.Н. Кролл

Использование записей о завершении строительства скважин для оценки уязвимости отечественных скважин на северо-востоке США к засухе

Изменение климата , 176 (2023) , стр. 95

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

109. [Мусольф и др., 2017](#)

А. Мусольф , Дж. Х. Флекенштейн , П. С. Рао , Дж. В. Явиц

Возникающие архетипические модели сопряженных гидрологических и биогеохимических реакций в водосборах

Geophys. Res. Lett. , 44 (9) (2017) ,

стр. 4143 - 4151 , [10.1002/2017GL072630](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

110. [Нобре и др., 2011](#)

AD Nobre , LA Cuartas , M. Hodnett , CD Rennó , G. Rodrigues , A. Silveira , ... , S. Saleska

Высота над ближайшим водостоком — новая гидрологически значимая модель рельефа

Дж. Гидрол. , 404 (1-2) (2011) ,

стр. 13 - 29 , [10.1016/j.jhydrol.2011.03.051](#)

[Посмотреть PDF-файлПросмотреть статьюПосмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

111. [Или, 2020](#)

Д. Или

Тирания малых масштабов — о представлении почвенных процессов в глобальных моделях поверхности суши

Водные ресурсы. Рез. , 56 (2020) , [10.1029/2019WR024846](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

112. [Удин и др., 2010](#)

Л. Уден , А. Кей , В. Андрасян , К. Перрен

Действительно ли водосборы, внешне схожие, являются гидрологически схожими?

Водные ресурсы. Рез. , 46 (11) (2010) , [10.1029/2009WR008887](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

113. [Пейдж и др., 2021 г.](#)

MJ Page , JE McKenzie , PM Bossuyt , I. Boutron , TC Hoffmann , CD Mulrow , ... , D. Moher

Заявление PRISMA 2020: обновленное руководство по составлению отчетов о систематических обзорах

BMJ , 372 (2021) , [10.1136/bmj.n71](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Google Scholar](#)

114. [Парайка и др., 2013](#)

J. Parajka , A. Viglione , M. Rogger , JL Salinas , M. Sivapalan , G. Blöschl

Сравнительная оценка прогнозов в неучтенных бассейнах - часть 1:

Исследования стока и гидрографа

Гидрол. Систем Земли , 17 (5) (2013) ,

стр. 1783 - 1795 , [10.5194/гесс-17-1783-2013](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

115. [Пасхалис и др., 2022 г.](#)

А. Пасхалис , С. Бонетти , И. Го , С. Фатичи

О неопределенности, вызванной функциями педотрансфера в моделировании наземной биосферы

Водные ресурсы. Рез. , 58 (9) (2022) , [10.1029/2021WR031871](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

116. [Пеллетье и др., 2016](#)

JD Pelletier , PD Broxton , P. Hazenberg , X. Zeng , PA Troch , GY Niu , ... , D. Gochis

Глобальный набор данных с координатной сеткой по толщине почвы, нетронутого реголита и осадочных отложений для регионального и глобального моделирования поверхности суши.

J. Adv. in Model. Earth Sys. , 8 (1) (2016) , стр . 41-65 ,[10.1002/2015MS000526](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

117.[Пенья-Герреро и др., 2022 г.](#)

М.Д. Пенья-Герреро , А. Умирбеков , Л. Тарасова , Д. Мюллер
Сравнение характеристик глобальных продуктов осадков высокого разрешения в зависимости от топографических и климатических градиентов Центральной Азии

Int. J. Climatol. , 42 (11) (2022) , стр. 5554 - 5569 ,[10.1002/joc.7548](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

118.[Перроне и Ясечко, 2017 г.](#)

Д. Перроне , С. Ясечко

Высохшие скважины грунтовых вод на западе США

Письмо по окружающей среде , 14 (2017) , стр. 104002

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[CrossRefПосмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

119.[Пфистер и др., 2017](#)

Л. Пфистер , Н. Мартинес-Каррерас , К. Хисслер , Дж. Клаус , Дж. Э. Каррер , М. К. Стюарт , Дж. Дж. Макдоннелл

Геология коренных пород контролирует хранение, смешивание и сброс водосборных бассейнов: сравнительный анализ 16 вложенных водосборных бассейнов

Гидрол. Процесс. , 31 (10) (2017) ,
стр. 1828 - 1845 ,[10.1002/гип.11134](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

120.[Пьерини и др., 2014](#)

NA Pierini , ER Vivoni , A. Robles-Morua , RL Scott , MA Nearing

Использование наблюдений и распределенной гидрологической модели для изучения пороговых значений стока, связанных с нашествием мескитовых деревьев в пустыне Сонора

Водные ресурсы. Res. , 50 (10) (2014) ,
стр. 8191 - 8215 ,[10.1002/2014WR015781](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

121. [Пучдефабрегас и др., 1999](#)

J. Puigdefabregas , A. Sole , L. Gutierrez , G. Del Barrio , M. Boer
Масштабы и процессы перераспределения воды и осадков в засушливых
районах: результаты полевых исследований на участке Рамбла-Хонда на
юго-востоке Испании

Earth Sci. Rev. , 48 (1-2) (1999) , стр. 39 - 70 , [10.1016/S0012-8252\(99\)00046-X](#)

[Посмотреть PDF-файл](#)[Просмотреть статью](#)[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

122. [Рабии и Хаберландт, 2015 г.](#)

Э. Рабии , У. Хаберландт

Применение коррекции смещения для объединения данных дождемера и
радара

J. Hydrol. , 522 (2015) , стр. 544 - 557 , [10.1016/j.jhydrol.2015.01.020](#)

[Посмотреть PDF-файл](#)[Просмотреть статью](#)[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

123. [Расмуссен и др., 2012](#)

Р. Расмуссен , Б. Бейкер , Дж. Кохендорфер , Т. Мейерс , С. Ландольт
, А. П. Фишер , ... , Э. Гутманн

Насколько хорошо мы измеряем снег: испытательный стенд

NOAA/FAA/NCAR для измерения зимних осадков

Bull. Am. Meteorol. Soc. , 93 (6) (2012) ,

стр. 811 - 829 , [10.1175/БАМС-Д-11-00052.1](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

124. [Ринальдо и др., 1991](#)

А. Ринальдо , А. Марани , Р. Ригон

Геоморфологическое рассеивание

Водные ресурсы. Res. , 27 (4) (1991) , стр. 513 - 525

[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

125. [Родригес-Кабальеро и др., 2014](#)

Э. Родригес-Кабальеро , И. Кантон , Р. Ласаро , А. Соле-Бенет

Взаимодействия между компонентами поверхности и свойствами осадков в
разных масштабах. Нелинейности в гидрологическом и эрозионном

поведении полувзасушливых водосборов

J. Hydrol. , 517 (2014) , стр. 815 - 825 , [10.1016/j.jhydrol.2014.06.018](#)

[Посмотреть PDF-файл](#)[Просмотреть статью](#)[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

126. [Родригес-Итурбе и Ринальдо, 2001 г.](#)

И. Родригес-Итурбе , А. Ринальдо

Фрактальные речные бассейны: случайность и самоорганизация

Издательство Кембриджского университета , Нью-Йорк (2001)

[Google Scholar](#)

127. [Роджер и др., 2012](#)

М. Роггер , Х. Пиркль , А. Вильоне , Й. Комма , Б. Коль , Р. Кирнбауэр ,
... , Г. Блёшль

Ступенчатые изменения в кривой частоты наводнений: управление
процессом

Водные ресурсы. Res. , 48 (5) (2012) ,

стр. 1 - 15 , [10.1029/2011WR011187](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Google Scholar](#)

128. [Сааведра и др., 2022 г.](#)

ФА Сааведра , А. Мусольф , Й. Фон

Фрейберг , Р. Мерц , С. Бассо , Л. Тарасова

Распутывание рассеяния в долгосрочных соотношениях концентрации и
расхода: роль типов событий. Гидрология и науки о системе Земли, (апрель)
(2022) , стр. 1 - 27

Извлекаются из

<https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-205>

[Google Scholar](#)

129. [Салинас и др., 2013](#)

JL Salinas , G. Laaha , M. Rogger , J. Parajka , A. Viglione , M. Sivapalan , G
. Blöschl

Сравнительная оценка прогнозов в неучтенных бассейнах - часть 2:

Исследования наводнений и низкого стока

Гидрол. Систем Земли , 17 (7) (2013) ,

стр. 2637 - 2652 , [10.5194/гесс-17-2637-2013](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

130. [Савич и др., 2011](#)

К. Савич , Т. Вагенер , М. Сивапалан , П. А. Трох , Дж. Каррильо

Классификация водосборов: эмпирический анализ гидрологического

сходства на основе функции водосбора на востоке США

Гидрол. Систем Земли , 15 (9) (2011) ,

стр. 2895 - 2911 , [10.5194/гесс-15-2895-2011](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

131. [Шнайдер и др., 2007](#)

МК Schneider , F. Brunner , JM Hollis , C. Stamm

На пути к гидрологической классификации европейских почв:
предварительная проверка ее прогностической способности для индекса
базового стока с использованием данных о расходе рек
Гидрол. Систем Земли , 11 (4) (2007) ,
стр. 1501 - 1513 , [10.5194/гесс-11-1501-2007](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

132. [Шумм, 1956](#)

СА Шумм

Эволюция дренажных систем и склонов на бесплодных землях в Перт-
Эмбой, Нью-Джерси

Бюллетень Геологического общества

Америки , 67 (5) (1956) , стр . 597-646 , [10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](#)

[View at publisher](#)

[Google Scholar](#)

133. [Сцибек и др., 2016](#)

Дж. Скибек , Т. Глисон , Дж. М. Маккензи

Предубеждения и тенденции в концептуальных моделях гидрогеологии зон
разломов: глобальная компиляция и категориальный анализ данных
Геофлюиды , 16 (4) (2016) , стр . 782-798 , [10.1111/гфл.12188](#)

[View at publisher](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

134. [Сейфрид и Уилкоккс, 1995 г.](#)

М.С. Сейфрид , Б.П. Уилкоккс

Масштаб и природа пространственной изменчивости: полевые примеры,
имеющие значение для гидрологического моделирования

Водные ресурсы. Res. , 31 (1) (1995) ,
стр. 173 - 184 , [10.1029/94WR02025](#)

[View at publisher](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

135. [Сивапалан и др., 2012](#)

М. Сивапалан , Его Святейшество Савление , Г. Блёшль

Социогидрология: новая наука о людях и воде

Гидрол. Процесс. , 26 (8) (2012) ,
стр. 1270 - 1276 , [10.1002/гип.8426](#)

[View at publisher](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

136. [Сомерс и Маккензи, 2020 г.](#)

Л. Д. Сомерс , Дж. М. Маккензи

Обзор грунтовых вод в высокогорных условиях

Wiley Interdiscip. Rev. Water , 7 (2020) , [10.1002/wat2.1475](#)

[View at publisher](#)

[Google Scholar](#)

137. [Спрингер, 1958 г.](#)

МЭ Спрингер

Пустынная мостовая и везикулярный слой некоторых почв пустыни

бассейна Лахонтан, Невада

Soil Sci. Soc. Am. J. , 22 (1) (1958) , стр . 63-

66 , [10.2136/sssaj1958.03615995002200010017x](#)

[View at publisher](#)

[Google Scholar](#)

138. [Ссеган и др., 2012a](#)

Х. Ссеган , Э. В. Толлнер , Й. М. Мохамуд , Т. К. Расмуссен , Дж.

Ф. Дауд

Достижения в методах отбора переменных I: Методы причинного отбора в сравнении с пошаговой регрессией и анализом главных компонентов на данных известных и неизвестных функциональных связей

J. Hydrol. , 438–439 (2012) , стр . 16–25 , [10.1016/j.jhydrol.2012.01.008](#)

[Посмотреть PDF-файлПросмотреть статьюПосмотреть в](#)

[ScopusGoogle Scholar](#)

139. [Ссеган и др., 2012b](#)

Х. Ссеган , Э. В. Толлнер , Й. М. Мохамуд , Т. К. Расмуссен , Дж.

Ф. Дауд

Достижения в методах отбора переменных II: влияние метода отбора

переменных на классификацию гидрологически схожих водоразделов в трех экорегионах Средней Атлантики

J. Hydrol. , 438–439 (2012) , стр . 26–38 , [10.1016/j.jhydrol.2012.01.035](#)

[Посмотреть PDF-файлПросмотреть статьюПосмотреть в](#)

[ScopusGoogle Scholar](#)

140. [Штейн и др., 2021 г.](#)

Л. Стайн , М. П. Кларк , В. Дж. М. Кнобен , Ф. Пьянози , Р. А. Вудс

Как климат и характеристики водосбора влияют на процессы формирования наводнений? Крупномасштабное исследование 671 водосбора на всей территории США

Водные ресурсы. Рез. , 57 (4) (2021) , [10.1029/2020WR028300](#)

[View at publisher](#)

[Google Scholar](#)

141.Штейн и др., 2022 г.

Л. Штейн , С.К. Муккавилли , Т. Вагенер

Спасательные круги для тонущей науки — улучшение возможности поиска и синтеза гидрологических публикаций

Гидрол. Процесс. (2022) , [10.1002/гип.14742](#)

[View at publisher](#)

[Google Scholar](#)

142.Штралер, 1957

АН Стралер

Количественный анализ геоморфологии водораздела

Эос . Перевод. AGU , 38 (6) (1957) , стр . 913-

920 , [10.1029/TR038i006p00913](#)

[View at publisher](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

143.Штумпф и др., 2017

Ф. Штумпф , К. Шмидт , П. Гебес , Т. Беренс , С. Шёнбродт-Штитт , А. Ваду , В. Сян , Т. Шолтен

Отбор проб с учетом неопределенности для улучшения цифровых почвенных карт

Катена , 153 (2017) , стр . 30-38 , [10.1016/j.catena.2017.01.033](#)

[Посмотреть PDF-файлПосмотреть статьюGoogle Scholar](#)

144.Сайед и др., 2003

К. Х. Сайед , Д. К. Гудрич , Д. Э. Майерс , С. Сорушян

Пространственные характеристики полей грозových осадков и их связь со стоком

Дж. Гидрол. , 271 (1-4) (2003) , стр. 1 - 21 , [10.1016/S0022-1694\(02\)00311-6](#)

[Посмотреть PDF-файлПосмотреть статьюПосмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

145.Тарасова и др., 2018

Л. Тарасова , С. Бассо , К. Понселе , Р. Мерц

Изучение контроля за осадками и стоком: 2. Региональные закономерности и пространственный контроль характеристик событий в Германии

Водные ресурсы. Res. , 54 (10) (2018) ,

стр. 7688 - 7710 , [10.1029/2018WR022588](#)

[View at publisher](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

146. [Томпсон и др., 2010](#)

SE Томпсон , CJ Харман , P. Heine , GG Katul

Растительность - Инфильтрационные отношения в зависимости от
градиентов климата и типа почвы

115 (2010) , стр. 1 - 12 , [10.1029/2009JG001134](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

147. [Тромп-Ван Мирвельд и Макдоннелл, 2006 г.](#)

HJ Tromp-Van Meerveld , JJ McDonnell

Пороговые соотношения в подповерхностном ливневом потоке: 2. Гипотеза
заполнения и разлива

Водные ресурсы. Res. , 42 (2) (2006) ,
стр. 1 - 11 , [10.1029/2004WR003800](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

148. [Репа и рис, 2006 г.](#)

DP Turnipseed , К. Райс

Национальная программа статистики речного стока: оценка статистики
высокого и низкого речного стока для неконтролируемых участков
USGS (2006)

Извлекаются из

<https://water.usgs.gov/software/NSS/>

[Google Scholar](#)

149. [Ван Лой и др., 2017](#)

К. Ван

Лой , Дж. Боума , М. Хербст , Дж. Кёстель , Б. Минасны , У. Мишра , ...
, Х. Вереекен

Функции педотрансфера в науке о Земле: проблемы и перспективы

Преподобный Geophys. , 55 (2017, 1 декабря) ,
стр. 1199 - 1256 , [10.1002/2017RG000581](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

150. [Ван Метер и др., 2017](#)

К. Дж. Ван Метер , Н. Б. Басу , П. Ван Каппеллен

Два столетия динамики азота: устаревшие источники и стоки в бассейнах
рек Миссисипи и Саскуэханна

Глобальные биогеохимические циклы , 31 (1) (2017) , стр . 2-23 ,[10.1002/2016GB005498](https://doi.org/10.1002/2016GB005498)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

151.[Верекен и др., 2010](#)

Х. Верееккен , М. Вайнантс , М. Джаво , И. Пачепский , М. Г. Шаап , М. Т. ван Генухтен

Использование функций педотрансфера для оценки гидравлических свойств почвы по Ван Генухтену-Муалему: обзор

Vadose Zone J. , 9 (4) (2010) , стр . 795-820 ,[10.2136/vzj2010.0045](https://doi.org/10.2136/vzj2010.0045)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

152.[Виглионе и др., 2010](#)

А. Вильоне , Дж. Б. Кирико , Р. Вудс , Г. Блёшль

Обобщенный синтез пространственно-временной изменчивости в реагировании на наводнения: аналитическая структура

Дж. Гидрол. , 394 (1-2) (2010) ,

стр. 198 - 212 ,[10.1016/j.jhydrol.2010.05.047](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.047)

[Посмотреть PDF-файл](#)[Просмотреть статью](#)[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

153.[Вагенер и др., 2007](#)

Т. Вагенер , М. Сивапалан , П. Трох , Р. Вудс

Классификация водосбора и гидрологическое сходство

Геогр. Компас , 1 (4) (2007) , стр. 901 - 931 ,[10.1111/j.1749-8198.2007.00039.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2007.00039.x)

[Посмотреть у издателя](#)

[Google Scholar](#)

154.[Вагенер и др., 2010](#)

Т. Вагенер , М. Сивапалан , П. А. Трох , Б. Л. МакГлинн , К.

Дж. Харман , Х. В. Гупта , ... , Дж. С. Уилсон

Будущее гидрологии: развивающаяся наука для меняющегося мира

Водные ресурсы. Res. , 46 (5) (2010) ,

стр. 1 - 10 ,[10.1029/2009WR008906](https://doi.org/10.1029/2009WR008906)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

155.[Вагенер и др., 2021 г.](#)

Т. Вагенер , Т. Глисон , Г. Коксон , А. Хартманн , Н. Хауден , Ф. Пиано
зи , ... , Р. Вудс

О занятиях гидрологией с драконами: осознание ценности моделей
восприятия и накопления знаний

Wiley Interdiscip. Rev. Water , 8 (6) (2021) , стр . 1-
17 ,[10.1002/ват2.1550](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Google Scholar](#)

156.[Уолтер и др., 2002](#)

МТ Вальтер , Т.С. Стенхейс , В.К. Мехта , Д. Тонгс , М. Сион , Э. Шней
дерман

Усовершенствованная концептуализация TOPMODEL для неглубоких
подповерхностных потоков

Гидрол. Процесс. , 16 (10) (2002) ,
стр. 2041 - 2046 ,[10.1002/гип.5030](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Google Scholar](#)

157.[Вэй и др., 2015](#)

В. Вэй , И. Юй , Л. Чэнь

Реакция гидрологии поверхностной почвы на микроструктуру биокоры в
лессовой среде засушливых земель, Китай

PLoS One , 10 (7) (2015) ,[10.1371/журнал.pone.0133565](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Google Scholar](#)

158.[Уэллс и др., 1985](#)

SG Wells , JC Dohrenwend , LD McFadden , BD Turrin , KD Mahrer

Эволюция ландшафта позднего кайнозоя на поверхности лавовых потоков
вулканического поля Сима, пустыня Мохаве

Калифорния. Бюллетень Геологического общества

Америки , 96 (12) (1985) , стр. 1518 - 1529 ,[10.1130/0016-
7606\(1985\)96<1518:LCLEOL>2.0.CO;2](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

159.[Уэст и др., 2022 г.](#)

C. West , R. Rosolem , AM MacDonald , MO Cuthbert , T. Wagener

Понимание управления процессами изменчивости подпитки грунтовых вод в
Африке через ландшафты подпитки

J. Hydrol. , 612 (2022) , Статья 127967 ,[10.1016/j.jhydrol.2022.127967](#)

[Посмотреть PDF-файлПросмотреть статьюПосмотреть в](#)

[ScopusGoogle Scholar](#)

160. [Уилкоккс и др., 2006](#)

BP Wilcox , MK Owens , WA Dugas , DN Ueckert , CR Hart

Кустарники, речной сток и парадокс масштаба

Гидрол. Процесс. , 20 (15) (2006) ,

стр. 3245 - 3259 , [10.1002/гип.6330](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

161. [Уилкоккс и др., 2008](#)

BP Wilcox , PI Taucer , CL Munster , MK Owens , BP Mohanty , JR Sorenson
, R. Bazan

Подземный ливневый поток играет важную роль в полувлажных
карстовых кустарниковых местностях.

Geophys. Res. Lett. , 35 (10) (2008) , [10.1029/2008GL033696](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

162. [Волок и Прайс, 1994 г.](#)

Д. Волок , К. Прайс

Влияние масштаба карты цифровой модели рельефа и разрешения данных
на модель водораздела на основе топографии

Водные ресурсы. Res. , 30 (1994) , стр. 3041 - 3052

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

163. [Яир и Коссовский, 2002](#)

А. Яир , А. Коссовский

Климат и свойства поверхности: гидрологическая реакция небольших
засушливых и полувлажных водоразделов

Геоморфология , 42 (1-2) (2002) , стр . 43-57 , [10.1016/S0169-555X\(01\)00072-1](#)

[Посмотреть PDF-файл](#)[Посмотреть статью](#)[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

164. [Якир и Морин, 2011](#)

Х. Якир , Э. Морин

Гидрологическая реакция полувлажного водораздела на
пространственные и временные характеристики конвективных дождевых
ячеек

Гидрол . Систем Земли , 15 (1) (2011) , стр . 393-404 , [10.5194/гесс-15-393-2011](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

165. [Янг и др., 2014](#)

П. Янг , Д. П. Эймс , А. Фонсека , Д. Андерсон , Р. Шреста , Н. Ф. Гленн , И. Цао

Каково влияние разрешения ЦМР, полученного с помощью LiDAR, на результаты моделирования крупномасштабного водораздела?

Окружающая среда. Модель. Программное

обеспечение. , 58 (2014) , стр. 48 - 57 , [10.1016/j.envsoft.2014.04.005](#)

[Посмотреть PDF-файл](#)[Посмотреть статью](#)[Google Scholar](#)

166. [Янг и др., 2019](#)

С. Янг , О. Бюттнер , Дж. В. Явитц , Р. Кумар , П. С.

Ц. Рао , Д. Борхардт

Пространственная организация населения и очистных сооружений в урбанизированных речных бассейнах

Водные ресурсы. Res. , 55 (7) (2019) ,

стр. 6138 - 6152 , [10.1029/2018WR024614](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

167. [Янг и др., 2021a](#)

С. Янг , Э. Бертуццо , О. Бюттнер , Д. Борхардт , PSC Rao

Возникающие пространственные закономерности конкурирующих

бентосных и пелагических водорослей в речной сети: экономичный анализ моделирования в масштабе бассейна

Водный закон , 193 (2021) ,

Статья 116887 , [10.1016/j.watres.2021.116887](#)

[Посмотреть PDF-файл](#)[Посмотреть статью](#)[Посмотреть в Scopus](#)[Google Scholar](#)

168. [Янг и др., 2021b](#)

С. Янг , Э. Бертуццо , Д. Борхардт , PSC Rao

Хортоновское масштабирование сопряженных гидрологических и

биогеохимических реакций в интенсивно управляемом речном бассейне

Front. Water , 3 (август) (2021) , стр . 1-13 , [10.3389/](#)

[frwa.2021.693056](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Google Scholar](#)

169. [Йе и др., 2020](#)

С. Йе , М. Сивапалан , К. Ран

Синергетическое воздействие изменчивости осадков и неоднородности землепользования на удержание нитратов в речных сетях: обострение или компенсация?

Водные ресурсы. Res. , 56 (8) (2020) , стр . 1-19 ,[10.1029/2018WR024226](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Google Scholar](#)

170.[Чжан и Монтгомери, 1994 г.](#)

В. Чжан , Д.Р. Монтгомери

Размер сетки цифровой модели рельефа, представление ландшафта и гидрологическое моделирование

Водные ресурсы. Res. , 30 (1994) , стр. 1019-1102

[Google Scholar](#)

171.[Циммер и Ганнон, 2018 г.](#)

MA Zimmer , JP Gannon

Процессы стока с гор к предгорьям: роль стратиграфии и структуры почвы в воздействии на характеристики стока в ландшафтах с высоким и низким рельефом

Гидрол. Процесс. , 32 (11) (2018) , стр. 1546 - 1560 ,[10.1002/гип.11488](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

172.[Циммер и МакГлинн, 2017 г.](#)

MA Zimmer , BL McGlynn

Эфемерные и прерывистые процессы формирования стока в условиях низкого рельефа, сильно выветренного водосбора

Водные ресурсы. Res. , 53 (8) (2017) , стр. 7055 - 7077 ,[10.1002/2016WR019742](#)

[Посмотреть у издателя](#)

Доступ к этой статье свободный.

[Посмотреть в ScopusGoogle Scholar](#)

173.[Зиппер и др., 2023 г.](#)

С. Зиппер , К.

М. Бефус , Р. Рейнеке , Д. Замрски , Т. Глисон , С. Руццанте , ... , М. Ф. П. Биркенс

GroMoPo: Портал моделей подземных вод для удобного, доступного, совместимого и многоразового (FAIR) моделирования

Грунтовые воды , 1 (2023) , стр . 1-4 ,[10.1111/гват.13343](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Google Scholar](#)

174. Зомер и др., 2022 г.

Р. Дж. Зомер, Дж. Сюй, А. Трабукко

Версия 3 Глобального индекса засушливости и потенциальной базы данных
эвапотранспирации

Научные данные, 9 (1) (2022), стр. 1-15, [10.1038/c41597-022-01493-1](#)

[Посмотреть у издателя](#)

[Google Scholar](#)

Cited by (1)

- [Location, Location, Location – Considering Relative Catchment Location to Understand Subsurface Losses](#)

2024, SSRN

© 2024 Авторы. Опубликовано Elsevier BV