2014

УДК 551.467(265.54)

В.А. Дубина¹, В.В. Плотников^{1, 2}, Н.С. Кот^{3*}

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,

690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43;

² Дальневосточный федеральный университет,

690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8;

³ Приморский океанариум ДВО РАН,

690059, г. Владивосток, ул. Пальчевского, 17

ДРЕЙФ ЛЬДА В ЗАЛИВЕ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

На основе архива изображений, построенных по измерениям спектрорадиометров MODIS, принятых со спутников Тегга и Aqua в 2004–2011 гг., впервые оценена динамика ледяного покрова на всей акватории зал. Петра Великого. Для различных ветровых условий с высоким пространственным разрешением построены карты дрейфа льда. Рассчитаны средние величины скорости дрейфа и ветрового коэффициента для четырёх отдельных районов залива. В условиях зимнего муссона в центральной части зал. Петра Великого скорость дрейфа южного направления составляет 0,5–0,6 м/с. Направление дрейфа в этой части залива отклоняется в среднем на 40° вправо от направления ветра. Дрейф льда у западного побережья залива направлен вдоль островов при широком диапазоне направлений ветра северных румбов (от северо-западных до северо-восточных), а скорость дрейфа варьирует в пределах 0,1–0,4 м/с.

Ключевые слова: зал. Петра Великого, спутниковые изображения, PCA, Landsat, MODIS, дрейф льда.

Dubina V.A., Plotnikov V.V., Kot N.S. Ice drift in Peter the Great Bay // Izv. TINRO. — 2014. — Vol. 178. — P. 148–156.

Dynamics of the sea ice cover in Peter the Great Bay is considered, for the first time for its whole area, on the base of satellite images received in 2004–2011 from the spectroradiometers MODIS mounted on the satellites Terra and Aqua. High spatial resolution maps of the ice drift are constructed for various wind conditions. Mean values of the drift velocity and wind coefficient are calculated for four parts of the Bay. In usual conditions of winter monsoon, the ice in the central part of Peter the Great Bay drifts southward with the velocity 0.5–0.6 m/s with deviation from the wind direction about 40° to the right; the ice at the western coast drifts along the island chain with the velocity 0.1–0.4 m/s under wind of any direction in the quadrant from northwest to northeast.

Key words: Peter the Great Bay, satellite image, synthetic aperture radar, Landsat, MODIS, ice drift.

^{*} Дубина Вячеслав Анатольевич, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, e-mail: dubina@poi.dvo.ru; Плотников Владимир Викторович, доктор географических наук, заведующий лабораторией, e-mail: vlad_plot@poi.dvo.ru; Кот Нина Сергеевна, старший тренер, e-mail:grinch88@bk.ru.

Dubina Vyacheslav A., Ph.D., senior researcher, e-mail: dubina@poi.dvo.ru; Plotnikov Vladimir V., D.Sc., head of laboratory, e-mail: vlad_plot@poi.dvo.ru; Kot Nina S., senior coach, e-mail: grinch88@bk.ru.

Введение

Основным инструментом для расчёта дрейфа морского льда являются спутниковые изображения одной и той же акватории, полученные с некоторым временным сдвигом. Дольше всего для этой цели используются измерения микроволновых радиометров SSM/I, установленных на спутниках серии DMSP, и радиометров видимого и ИК-диапазона AVHRR, размещённых на спутниках серии NOAA. Из-за невысокого пространственного разрешения (соответственно 12,5 и 1,1 км) эти данные непригодны для исследования динамики ледяного покрова в зал. Петра Великого. До недавнего времени информация о дрейфе льда в заливе исчерпывалась следующими данными (Гидрометеорология ..., 2003): по данным инструментальных наблюдений средние скорости дрейфа льда в Амурском заливе составляют 10–15 см/с и только при ветрах более 10 м/с превышают 40 см/с. В качестве ориентировочных эти данные можно использовать для всего зал. Петра Великого.

Возможность исследовать мезомасштабные особенности дрейфа льда в зал. Петра Великого появилась в 2002 г. с запуском спутника Aqua. На этом спутнике, так же как и на спутнике Terra, запущенном тремя годами ранее, установлен спектрорадиометр MODIS. Пространственное разрешение на двух видимых каналах этого прибора составляет 250 м, а ширина полосы обзора превышает 2300 км, что позволяет каждый день получать с разницей во времени примерно в 100 или 200 мин два изображения, целиком захватывающих залив.

В настоящей работе приводятся результаты исследования динамики ледяного покрова зал. Петра Великого, основанного на измерениях спектрорадиометров MODIS с привлечением радиолокационных данных, полученных со спутников ERS-1, ERS-2, Envisat и обширного архива изображений спутников серии Landsat (1986–2014 гг).

Материалы и методы

Для анализа динамики ледовой обстановки использовались изображения в истинном цвете с разрешением 250 м, которые создаются комбинацией 1-го (длина волны $\lambda = 0,645$ мкм, разрешение 250 м), 4-го ($\lambda = 0,555$ мкм, разрешение 500 м) и 3-го ($\lambda = 0,469$ мкм, разрешение 500 м) спектральных каналов MODIS. Таких спутниковых продуктов для всего потока измерений MODIS в свободном доступе в Интернете нет, но на сайте «MODIS Rapid Response System» (http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/), который создан для мониторинга лесных пожаров, хранится архив видимых изображений с пространственным разрешением 250 м для большей части суши. Многие изображения частично захватывают морские акватории. Для анализа океанических явлений эти продукты малопригодны из-за специфической коррекции гистограммы, предназначенной для контрастной визуализации суши, но отлично подходят для изучения морского льда.

По адресу http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/subsets/index.php?subset=FAS_China2 находятся оперативные изображения северо-восточного Китая и Приморья, которые захватывают северо-западную часть Японского моря, включая зал. Петра Великого. Архивные изображения для этого района имеются с некоторыми пропусками с апреля 2004 г. Продукты представлены в нескольких графических форматах, в том числе GeoTIFF и KMZ (файлы для просмотра в программе Google Earth).

Исследование динамики ледяного покрова зал. Петра Великого проводилось на основе архива спутниковых изображений, для создания которого с указанного адреса были загружены изображения (в формате GeoTIFF), полученные в безоблачных условиях со спутников Aqua и Terra в зимние сезоны 2004–2011 гг. Изображения обрезались до границ примерно 42°00'–43°30' с.ш. 130°30'–133°30' в.д. и группировались слоями в одном файле формата PSD (Photoshop Document — растровый формат хранения графической информации). В результате были сформированы семь файлов — на каждый зимний сезон начиная с 2004 по 2011 г. Всего было собрано 1116 изображений общим размером 2 Гб.

Подобная организация архива позволяет при проведении исследования ледовой обстановки сочетать преимущества ГИС-технологий и средств обработки растровых

изображений, имеющихся в программе Photoshop. Программа Adobe Photoshop является в настоящее время самым мощным растровым процессором. Она содержит все базовые операции векторной графики, что позволяет создавать векторные полигональные слои, например границы льдов, кромки припая и т.п. С помощью встроенных в программу фильтров можно в интерактивном режиме выполнять классификацию льдов по возрастным градациям.

Исходные изображения представлены в простой цилиндрической проекции (Plate Carree) с центром в координатах 0° с.ш. 0° в.д. и моделью эллипсоида WGS-84. В этой проекции размер пикселя изображения составляет 0,002596° на 0,002248°, что для зал. Петра Великого примерно равно 212 м по долготе и 250 м по широте. Для упрощения пространственных вычислений размер пикселя изображения считался равным 231 х 231 м.

Существует несколько методов автоматизированного расчёта векторов дрейфа льда (Алексанин и др., 2011). Но все они дают серьёзные ошибки, поэтому, если требуется повышенная точность (ошибка менее 30 %), расчёты производят «вручную» методом маркеров (Sandven et al., 2007).

В настоящей работе скорость и направление дрейфа льда восстанавливались методом маркеров по двум изображениям MODIS, принятым в один день с интервалом ≈ 100 или 200 мин. Для нескольких случаев дополнительно были рассчитаны векторы дрейфа льда по изображениям, принятым с интервалом ≈ 12 ч радиолокационными станциями с синтезированной апертурой (PCA) со спутника Envisat на последовательных восходящем и нисходящем витках. Для отдельных дат по изображениям MODIS были построены векторы для всего зал. Петра Великого. В остальных случаях скорость дрейфа рассчитывалась по одному значению для четырех квадратов, границы которых показаны на рис. 1. Поскольку ошибка привязки пар изображений друг к другу не превышала одного пикселя, точность расчётов можно оценить как 231 м/6000 с $\approx 0,04$ м/с.



Рис. 1. Ледяной покров в зал. Петра Великого по измерениям тематического картографа ЕТМ+ со спутника Landsat-7 на 3-м, 2-м и 1-м каналах 12 января и 6 февраля 2001 г. Показаны границы районов, в которых рассчитывались скорости дрейфа льда и ветровой коэффициент

Fig. 1. Ice cover of Peter the Great Bay on the images combined from 3, 2 and 1 channels of ETM+ device (Landsat-7) received on January 12 and February 6, 2001. Areas of the ice drift velocity and wind coefficient averaging are shown

Архив спутниковых данных был дополнен доступной гидрометеорологической информацией, в первую очередь наблюдениями на метеостанциях «Владивосток» и

«Посьет», которые загружались с сервера «Погода России» (http://meteo.infospace.ru/ win/r_main.htm). Ветровой коэффициент рассчитывался по измерениям ветра на метеостанции «Владивосток».

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показано распределение льда в заливе в середине зимы, построенное по измерениям тематического картографа ETM+ со спутника Landsat-7 на 3-м, 2-м и 1-м каналах в 2001 г. Полоса обзора спутника не перекрывает всю акваторию зал. Петра Великого, поэтому спутниковые измерения, выполненные 12 января и охватывающие большую часть залива, скомбинированы с измерениями, проведёнными 6 февраля и захватывающими заливы Стрелок, Восток и Находка. Припай наблюдается в Амурском заливе и в небольших вторичных заливах и бухтах, а большую часть центральной части акватории занимают дрейфующие начальные виды льда и нилас. Гистограмма полученного изображения скорректирована таким образом, чтобы были лучше различимы начальные виды льда и тёмный нилас в северной части Уссурийского залива. Поэтому тёмный и белый нилас на рис. 1 близки по цвету. Из заливов Посьета, Стрелок, Восток и Находка по ветру распространяется ледяное сало. К востоку от о-вов Римского-Корсакова наблюдаются различные формы плавучего заснеженного молодого льда, который оторвался от припая в южной части Амурского залива. Плавучий заснеженный лёд выглядит на рис. 1 как большие и обширные ледяные поля, но на самом деле представляет собой массивы сжатого льда мелких форм. Структура этих массивов, несмотря на снег, различима на панхроматическом изображении с разрешением 15 м. Зимний сезон 2000/2001 г. по многолетнему ряду наблюдений считается одним из самых ледовитых (Петров, Стасюк, 2012). Поэтому, несмотря на то что основу изображения составляет измерение 12 января, рис. 1 представляет собой типичную картину распределения ледяного покрова в зал. Петра Великого в стадии его максимального развития: большую часть акватории занимает дрейфующий лёд, который зимним муссоном выносится в район таяния на границе залива. В стадии максимального развития ледяного покрова его граница остаётся практически неизменной.

Зимой над большей частью акватории зал. Петра Великого преобладает северо-западный ветер. Штормовые ветра продолжительностью 3–4 сут наблюдаются только северо-западного направления, очень редко — северо-восточного. Штормовые ветра других направлений в зимний период никогда не продолжаются более суток (Шапкина, 1963). Ветровой коэффициент дрейфа льда, т.е. отношение скорости дрейфа к скорости ветра, который дрейф вызывает, зависит от скорости ветра, возраста, шероховатости и формы льда, удалённости от берегов. По измерениям в Арктике средний ветровой коэффициент составляет 0,02 (Зубов, 1945). Измерения спектрорадиометрами MODIS впервые позволили оценить дрейф льда на всей акватории залива при различных ветровых условиях.

На рис. 2 представлены спутниковые изображения зал. Петра Великого, принятые в условиях классического зимнего муссона. По данным метеостанции «Владивосток», с 00:00 Гр. 25 по 18:00 Гр. 26 февраля 2005 г. направление ветра менялось в диапазоне 330–350°, а скорость составляла 2–5 м/с с усилением до 11 м/с в 06:00 Гр. 26 февраля. В этот день были получены два изображения MODIS (со спутника Terra в 02:00 Гр. и со спутника Aqua в 03:40 Гр.) (рис. 2, а) и два изображения РСА со спутника Envisat: на нисходящем витке в 01:33 Гр. (рис. 2, б) и восходящем в 12:51 Гр. В момент первого пролёта спутника Envisat на кордоне морского заповедника на о. Большой Пелис был зарегистрирован ветер с направлением 320° и со скоростью 8 м/с.

Голубыми стрелками на рис. 2 показано направление, а цифрами — средняя скорость дрейфа льда, рассчитанная на временных интервалах 1 ч 40 мин (рис. 2, а) и 11 ч 18 мин (рис. 2, б). В центральной части зал. Петра Великого скорость дрейфа южного направления составляла 0,5–0,6 м/с. Направление дрейфа в этой части залива отклонялось от направления ветра примерно на 40° вправо (диапазон изменения 30–50°). Между о-вами Большой Пелис и Аскольд скорость ветра колеблется в пределах 2 м/с (Дубина и др., 2008), следовательно, ветровой коэффициент при скорости ветра 7–9 м/с



Рис. 2. Дрейф льда в зал. Петра Великого 26 февраля 2005 г., рассчитанный по изображениям (а) MODIS, принятым со спутников Тегга и Aqua с интервалом 1 ч 40 мин. Приведено изображение, полученное в 02:00 Гр.; РСА (б), принятым со спутника Envisat на восходящем и нисходящем витках с интервалом 11 ч 18 мин. Приведено изображение, полученное в 01:33 Гр. Голубыми стрелками показано направление дрейфа льда, а цифрами — средняя скорость. Красными стрелками отмечены контрастные полосы начальных видов льда, ориентированные по ветру

Fig. 2. Ice drift in Peter the Great Bay on February 26, 2005 calculated from: \mathbf{a} — two images of MODIS spectraradiometers (Terra and Aqua satellites) taken with 100 min interval (the image for 02:00 UTC is presented); $\mathbf{6}$ — two images of synthetic aperture radar (Envisat satellite) taken on ascending and descending with 678 min interval (the image for 01:33 UTC is presented). Blue arrows shows the ice drift direction, numbers are the average drift speed, red arrows marks contrasting down-wind stripes of young ice

для дрейфа льда в открытой части зал. Петра Великого составлял 0,07–0,08. На границе Уссурийского залива скорость дрейфа уменьшается с востока на запад до 0,2 м/с, что обусловлено вариациями поля ветра и близостью островов (рис. 2). В вершине Уссурийского залива дрейф льда со скоростью 0,3 м/с направлен на юг-юго-запад. На рис. 2 в виде контрастных полос, ориентированных по ветру, видны начальные виды льда (ледяные иглы, ледяное сало), которые формируются в бухте Рейд Паллада и в заливах Стрелок, Восток, Находка и выносятся в открытые воды зал. Петра Великого со скоростью 0,4 м/с. На РЛ-изображении эти полосы отмечены красными стрелками (рис. 2, б), а на рис. 2 (а) им соответствуют векторы, совпадающие с направлением ветра. Отметим, что в южной части Амурского залива лёд смещается со скоростью 0,2 м/с в направлении на запад–юго-запад к п-ову Ломоносова. Такое направление дрейфа можно объяснить влиянием приливо-отливных течений и/или сгонно-нагонных эффектов.

На рис. 3–4 приведены карты дрейфа льда в конце января — феврале 2009 г. в различных ветровых условиях. Ветра южных румбов 7–9 м/с прижимают весь лёд в северную часть залива (рис. 3). При ветрах ≤ 3 м/с любых направлений дрейф льда определяется течениями в заливе и составляет 0,1–0,2 м/с (рис. 3–4). Плавучий лёд остаётся на акватории залива и служит трассерами поверхностных течений. Привлекает внимание вихревая структура течений. Красной буквой Z на рис. 3–4 отмечены положения центров зарегистрированных циклонических вихрей. Зимой спиральные циклонические вихри фиксированы практически везде, где встречался плавучий лёд. Минимальный вихрь (диаметром около 1 км) наблюдался в бухте Витязь, а максимальных размеров (диаметром до 30 км) вихри достигают в Уссурийском заливе (рис. 4).

Исходя из результатов визуального анализа динамики ледяного покрова зал. Петра Великого для расчета средних значений скорости дрейфа льда и ветрового коэффициента акватория залива была разбита на четыре района (см. рис. 1). В расчётах не учитывались случаи со скоростями ветра менее 4 м/с (см. таблицу). В Амурском заливе эти величины составляют соответственно 0,25 м/с и 0,04, в Уссурийском заливе — 0,30 м/с и 0,05, в районе А1 — 0,27 м/с и 0,04. В центральной части зал. Петра Великого (район О) величины достигают значений 0,36 м/с и 0,06.

Результаты расчета средних значений скорости дрейфа льда и ветрового коэффициента зал. Петра Великого Mean values of ice drift velocity and wind coefficient for 4 areas of Peter the Great Bay

| Район залива (рис. 1) | А | A1 | U | 0 |
|-----------------------------------|------|------|------|------|
| Количество измерений | 248 | 309 | 267 | 161 |
| Ветровой коэффициент | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,06 |
| Средняя скорость дрейфа льда, м/с | 0,25 | 0,27 | 0,30 | 0,36 |

В литературе чаще всего для ветрового коэффициента встречается значение 0,02–0,03. Эта величина получена как экспериментально (Зубов, 1945; Тимохов, Хейсин, 1987) для дрейфа сплочённых ледяных полей, так и теоретически для дрейфа отдельных льдин (Тимохов, Хейсин, 1987). Повышенные значения ветрового коэффициента могут быть объяснены тем, что для расчётов использовались значения скорости ветра на станции «Владивосток», а при ветрах северных румбов скорость ветра на акватории увеличивается с увеличением расстояния от берега (Дубина и др., 2008). Значения ветрового коэффициента выше 0,03 не являются редкостью. Например, Н.Н. Зубов приводит результаты береговых наблюдений за ветровым дрейфом льдин в Чукотском

Заключение

море, которые показали средние значения коэффициента 0,035-0,040. При этом мак-

симальные значения достигали 0,08-0,10 (Зубов, 1945).

Анализ обширного архива изображений, полученных со спутников серии Landsat, существенно расширил представления о пространственных особенностях ледяного покрова зал. Петра Великого, а измерения спектрорадиометрами MODIS, выполненные с двух спутников с интервалом ≈ 100 и 200 мин, впервые позволили оценить динамику льда



Рис. 3. Дрейф льда в зал. Петра Великого на видимых изображениях спектрорадиометра MODIS: а — 27 января 2009 г., ветер 160–150°, 3 м/с; б — 28 января 2009 г., ветер 150–160°, 6–8 м/с; в — 1 февраля 2009 г., ветер 360°, 8–9 м/с. Красной буквой Z (а) показаны положения циклонических вихрей

Fig. 3. Ice drift on visible MODIS images: **a** — January 27, 2009: wind 150–160°, 3 m/s (Z — cyclonic eddies); **6** — January 28, 2009: wind 150–160°, 6–8 m/s; **B** — February 1, 2009: wind 360°, 8–9 m/s



Рис. 4. Дрейф льда в зал. Петра Великого на видимых изображениях спектрорадиометра MODIS: **а** — 8 февраля 2009 г., ветер 20–220°, 1–4 м/с; **б** — 10 февраля 2009 г., ветер 360–150°, 3 м/с; **в** — 22 февраля 2009 г., ветер 350–20°, 4 м/с. Красной буквой Z показаны положения циклонических вихрей

Fig. 4. Ice drift on visible MODIS images: **a** — February 8, 2009: wind 20-220°, 1–4 m/s; **6** — February 10, 2009: wind 360–150°, 3 m/s; **B** — February 22, 2009: wind 350–20°, 4 m/s. Z — cyclonic eddies

на всей акватории залива. Для различных ветровых условий с высоким пространственным разрешением построены карты дрейфа льда в заливе. Рассчитаны средние величины скорости дрейфа и ветрового коэффициента для четырёх отдельных районов залива.

В типичных условиях северо-западного муссона в стадии максимального развития ледяного покрова в зал. Петра Великого большую часть его акватории занимают начальные виды льда и нилас, дрейфующие к границе залива. Припай наблюдается только в Амурском заливе и в небольших вторичных заливах и бухтах.

При северо-западном ветре 7–9 м/с в центральной части зал. Петра Великого скорость дрейфа южного направления составляет 0,5–0,6 м/с. Направление дрейфа в этом районе отклоняется от направления ветра примерно на 40° вправо (диапазон изменения 30–50°). Полученные ветровые коэффициенты позволяют предположить, что скорости дрейфа льда в открытой части залива могут достигать 1 м/с.

Дрейф льда у западного побережья залива составляет 0,1–0,4 м/с и, как правило, направлен вдоль островов при широком диапазоне направлений ветра северных румбов (от северо-западных до северо-восточных). Однако отмечены случаи, когда при устойчивом северо-западном ветре около 10 м/с на протяжении 12 ч лёд в южной части Амурского залива смещался со скоростью 0,2 м/с в направлении на запад–юго-запад в сторону п-ова Ломоносова.

Минимальная среднемесячная температура и максимальный среднемесячный ветер в г. Владивосток наблюдаются в январе (-13,2 °C, 7,8 м/с)*. От вершины Уссурийского зал. до границы своего распространения лёд проходит 85–90 км. Даже при ветровом коэффициенте 0,02 время, которое проходит с момента образования льда до момента таяния, составляет 6,7 сут. По формуле для расчёта толщины льда по сумме градусодней мороза (Зубов, 1945) за 6 сут при температуре воздуха –13,2 °C лёд по-является и нарастает до толщины 10,5 см. Анализ спутниковых данных показывает, что при ветрах северных румбов 7–9 м/с дрейфующий лёд в заливе находится не более 3–4 сут. Поэтому большую часть дрейфующего льда составляют начальные виды и нилас. Следовательно, зал. Петра Великого можно рассматривать как стационарную полынью площадью примерно 8000 км².

Работа выполнена при поддержке грантов ДВО РАН 12-I-0-06-028, 12-III-А-07-032 и 12-III-А-07-129, а также гранта РФФИ 11-05-12047-офи-м.

Список литературы

Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Карнацкий А.Ю. Автоматический расчёт скоростей перемещений ледовых полей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2011. — Т. 8, № 2. — С. 9–17.

Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 8 : Японское море, вып. 1 : Гидрометеорологические условия / под ред. А.С. Васильева, Ф.С. Терзиева, А.Н. Косарева. — СПб. : Гидрометеоиздат, 2003. — 398 с.

Дубина В.А., Митник Л.М., Катин И.О. Особенности циркуляции вод залива Петра Великого на основе спутниковых мультисенсорных данных // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря. — М. : ГЕОС, 2008. — С. 82–96.

Зубов Н.Н. Льды Арктики : монография. — М. : Главсевморпуть, 1945. — 360 с.

Петров А.Г., Стасюк Е.И. Характер ледообразования в экстремальные и близкие к ним зимние периоды на акватории залива Петра Великого // Тр. ДВНИГМИ. — 2012. — Вып. 154. — С. 122–144.

Тимохов Л.А., Хейсин Д.Е. Динамика морских льдов (математические модели) : монография. — Л. : Гидрометеоиздат, 1987. — 272 с.

Шапкина В.Ф. Прогноз границы четырёхбальных льдов в заливе Петра Великого // Тр. ДВНИГМИ. — 1963. — Вып. 13. — С. 111–128.

Sandven S., Kloster K., Dagestad K. Ice drift in the Fram Strait from Envisat ASAR data // Proc. «Envisat Symposium 2007». — Montreux, Switzerland, 2007.

Поступила в редакцию 16.05.14 г.

^{*} Климат Владивостока. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 248 с.