

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ РЕГУЛЯРНЫХ ВИХРЕЙ В ЗАЛИВАХ ШАНТАРСКОГО АРХИПЕЛАГА, ОХОТСКОЕ МОРЕ

© 2012 г. К. А. Рогачёв

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

E-mail: rogachev@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 21.04.2011 г.

У выдающихся в море мысов в заливах Шантарского архипелага формируются вихри диаметром 4–40 км. Такие вихри играют важную роль в дисперсии льда и планктона. Формирование этих вихрей исследовано на основе спутниковых и морских наблюдений. Для построения векторов скорости использовались изображения со спутников Aqua и Terra (данные канала 1 радиометра MODIS с пространственным разрешением 250 м). Измерения течений сделаны по последовательным спутниковым изображениям с интервалом около 100 мин. Для определения течений по спутниковым данным были выбраны крупные льдины. Для каждой пары изображений построены векторы перемещений льдин и рассчитаны их скорости. По этим данным сделана оценка дивергенции. Морские наблюдения включают прямые наблюдения за течениями и СТД данные. Наблюдения за течениями получены электромагнитными измерителями, выставленными на заякоренные буи. Результаты прямых наблюдений указывают на приливные течения как основной механизм формирования непродолжительных, но регулярных областей конвергенции, связанных с формированием вихрей.

Ключевые слова: вихри у мысов, залив Академии, Охотское море, конвергенция течений

ВВЕДЕНИЕ

Шантарский архипелаг, расположенный к югу от области формирования холодных и плотных шельфовых вод, — основная зона конвергенции льда в северо-западной части Охотского моря. По этой причине он является местом самого продолжительного присутствия морского льда в море (Kimura, Wakatsuchi, 2004). По наблюдениям за дрейфом буев Аргос, в теплое время года (с мая по август) на востоке региона поверхностная циркуляция находится под воздействием потока вод северного направления из Сахалинского залива. Этот поток распространяется вплоть до северного побережья моря и, поворачивая на юго-запад, формирует циклоническую циркуляцию (рис. 1). Комбинация сибирского антициклона на континенте и алеутского минимума в океане зимой приводит к сильному северо-восточному ветру на северном шельфе моря. Поскольку морской лед дрейфует примерно параллельно этому ветру (Kimura, Wakatsuchi, 2000), система течений переносит лед в заливы Шантарского архипелага, где он может сохраняться вплоть до середины июля. В северной прибрежной области Охотского моря формируется около 0.87×10^6 км² год морского льда. Это составляет значительную часть площади морского льда всего моря (около 1×10^6 км²). Благодаря конвергенции, около 0.74×10^6 км² льда исчезает в районе Шантарского архипелага (Kimura, Wakatsuchi, 2004). Сокращение площади льда в заливах архипелага вызвано его деформацией

цией и увеличением толщины. Однако механизмы, которые поддерживают этот процесс, изучены слабо.

Залив Академии, расположенный в северо-западной части Охотского моря, окруженный островами Шантарского архипелага, находится вблизи самой холодной области азиатского континента (рис. 1). Следствием этого является существование холодных плотных шельфовых вод с температурой около -1.7°C , которые сохраняются в течение всего года. Северный шельф Охотского моря играет важную роль в вентиляции северо-тихоокеанских промежуточных вод (Shcherbina et al., 2003).

Залив Академии и прилегающие к нему заливы Шантарского архипелага — важное место питания полярных китов (*Balaena mysticetus*) (Дорошенко, 1996; Ivashchenko, Clapham, 2010). Адвекция холодной воды из северной части Охотского моря и присутствие льда, по-видимому, являются процессами, поддерживающим арктические виды зоопланктона, которые служат добычей для полярных китов в других районах их обитания.

Глубина моря в заливе Академии растет с юга на север от нескольких метров до 50 м на его северной границе. Гидрологические условия находятся под влиянием сильных приливных течений и речного стока. Приливные течения на основе прямых наблюдений на двух буйковых станциях в заливе Академии исследовались ранее в работе (Rogachev et al., 2008). Однако пространственная

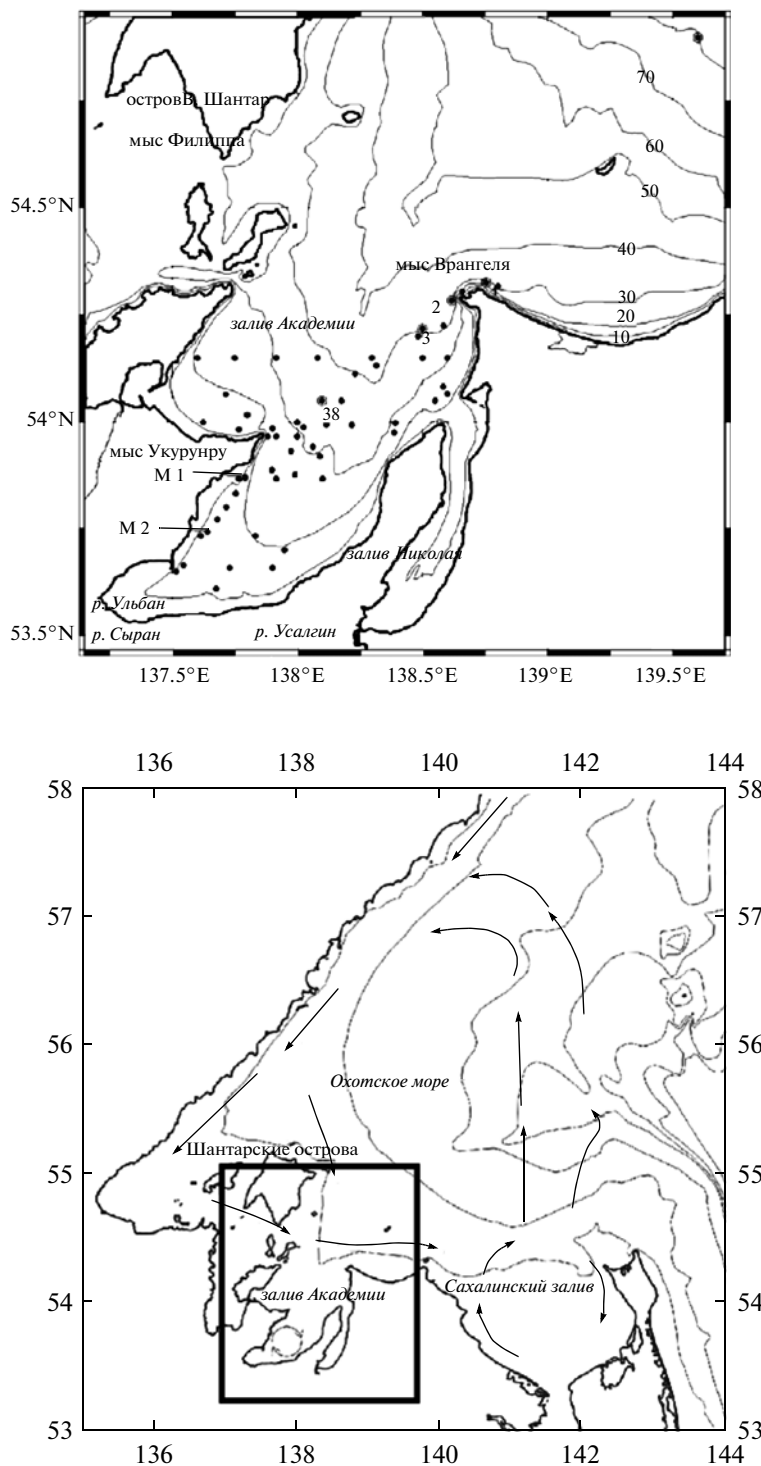


Рис. 1. Положение выполненных станций и заякоренных буев (М1 и М2) с измерителями течений и уровня. Показаны изобаты через 10 м. Район исследований и схема поверхностной циркуляции вод, построенная по наблюдениям за дрейфующими буями, показаны квадратом на нижнем рисунке.

изменчивость приливных течений до сих пор неясна. В заливе наблюдаются приливы амплитудой около 3 м и приливные течения амплитудой около 80 см/с (Rogachev et al., 2008). Приливные течения в регионе приводят к значительной дисси-

пации приливной энергии и тем самым — к сильному перемешиванию (Rogachev et al., 2000). Они также являются основным механизмом, вызывающим разрушение и таяние льда в этой части моря и образование полыней (Rogachev et al., 2000;

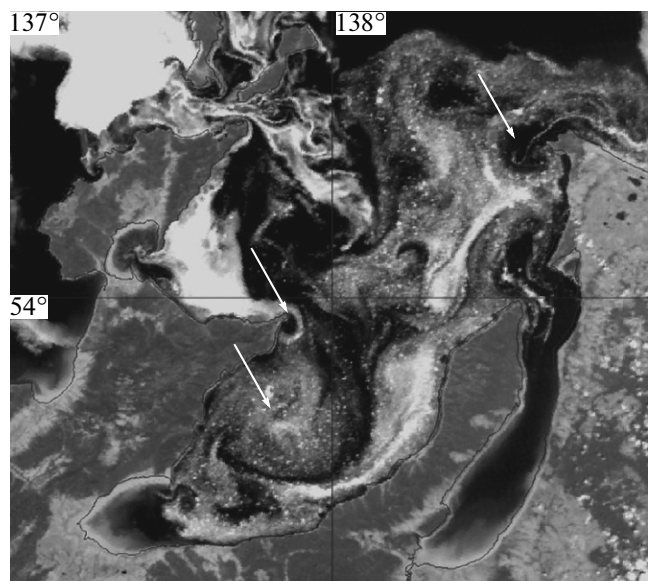


Рис. 2. Поле льда по данным по данным спутника Aqua в июне 2007 г. (данные канала 1 радиометра MODIS). Стрелками показаны рассматриваемые вихри. Антициклонический вихрь диаметром около 40 км виден во внутренней области залива Академии. Антициклонический вихрь диаметром 4 км расположен к юго-востоку от м. Укурунру.

Kimura, Wakatsuchi, 2004). В свою очередь быстро тающий лед понижает соленость верхнего слоя моря. Источником вод низкой солености в теплое время года является речной сток. Учитывая значительный сток пресной воды, залив Академии можно рассматривать как район с сильным влиянием речного стока. Поэтому можно полагать, что на течения в заливе оказывает влияние эстуарная (гравитационная) циркуляция. Действительно, океанографические наблюдения, выполненные в летнее время, показали сильную стратификацию и струю вод низкой солености, связанную с речным стоком. Накопление пресной воды ведет к формированию антициклонического вихря во внутренней области залива. Вместе с тем, природа этого вихря до сих пор не ясна. Одна из гипотез предполагает, что формирование антициклонического вихря в заливе связано с регулярными вихрями у мысов. В настоящей работе морской лед использован как трассер для исследования вихрей у мысов и их роли в циркуляции вод в заливе. На основе спутниковых определений скорости течений получены оценки конвергенции вод.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для определения доминирующих физических процессов, влияющих на циркуляцию вод в заливе Академии, использованы спутниковые и прямые наблюдения за течениями. Спутниковые наблюдения включают изображения видимых каналов радиометра AVHRR (ИСЗ серии NOAA),

предоставленные Центром коллективного пользования регионального спутникового мониторинга ДВО РАН. Для отслеживания траекторий отдельных льдин использовались изображения со спутников Aqua и Terra (данные канала 1 радиометра MODIS с пространственным разрешением 250 м). Для определения течений по спутниковым данным выбраны крупные льдины, которые были отчетливо видны на каждом изображении. Доминирующий дрейф льда в период наблюдений в теплое время года в заливе связан с приливом. Это отчетливо видно на последовательных спутниковых изображениях. Для каждой пары изображений, разделенных промежутком времени около 100 м, были построены векторы перемещений льдин и рассчитаны скорости дрейфа льда. Ошибка измерения скорости дрейфа таким способом составила около 4 см/с, что соответствует примерно 4% при скорости дрейфа 1 м/с. Рассчитанные скорости были использованы для оценки дивергенции потока.

Детальные наблюдения за термохалинной структурой были выполнены зондом Seabird 19. Течения были измерены путем постановки заякоренных буев с измерителями течений S4 Inter-ocean Systems. Материалы прямых океанографических наблюдений были собраны в двух экспедициях ТОИ ДВО РАН, выполненных НИС "Луговое". В ходе этих работ выполнялись две детальные СТД съемки в заливе. На рис. 1 указаны места постановки буев с измерителями течений и положение гидрологических станций.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Спутниковые наблюдения указывают, что пресная вода, стекающая в залив Академии, формирует антициклоническую циркуляцию. Такая циркуляция накапливает значительную часть речного стока р. Ульбан и многочисленных ручьев, впадающих в залив. Наблюдениями за дрейфом льда также выявили антициклоническую циркуляцию в заливе на поверхности с периодом около 3 дней (рис. 2). Средняя циркуляция в южной части залива Академии в теплый период года определяется речным стоком и накоплением пресной воды антициклоническим вихрем. Перенос массы эстуарного потока зависит от градиента плотности в эстуарии. В то время как сток пресной воды и тающий лед поддерживают стратификацию в заливе, приливное перемешивание в придонном слое ее разрушает. В вершине залива летом наблюдается высокая стратификация, вызванная потоком теплой воды низкой солености в верхнем слое. В северную часть залива поступает холодная и относительно соленая вода из глубокой части моря. В июне такая вода хорошо выделяется на спутниковых изображениях сильно разряженным полем льда (рис. 2–3). В верхнем слое относительно теплая вода низкой солености рас-

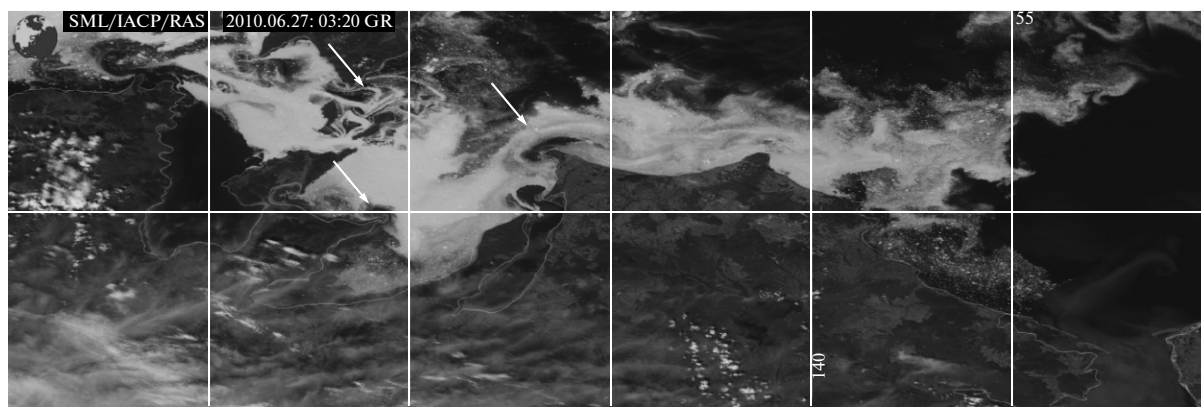


Рис. 3. Поле льда по данным спутника Aqua 26 июня 2010 г. (данные канала 1 радиометра MODIS). Антициклонический вихрь диаметром около 30 км с выраженной полыней в центре хорошо виден у м. Врангеля. Циклонический вихрь диаметром около 20 км виден у м. Филиппа. Меньшего диаметра (4 км) циклонический вихрь расположен к северу от м. Укурунру. Стрелки указывают положение вихрей.

пространялась на север вдоль восточного побережья.

Антициклоническая циркуляция хорошо выражена в поле дрейфующего льда в заливе в июне. Несколько крупных льдин были захвачены этой циркуляцией и совершили оборот, что позволило определить период циркуляции вихря и скорость поверхностного течения. Диаметр циркуляции составил около 40 км. При этом период циркуляции в вихре составил около 3 дней. Средняя скорость течения на поверхности составила около 0.3 м/с.

Гидрологические наблюдения показали, что антициклонический вихрь во внутренней области залива имеет глубину около 7–8 м, солености верхнего слоя около 27–29 епс, температуру 8–12°C, плотность 20–23 кг/м³. Вертикальные профили солености показывают, что стратификация в заливе значительно выше, чем в окружающих водах. Резкий слой скачка отделяет эту воду от холодной (~2–4°C) и соленой воды (~31–32 епс) в нижнем слое. В случае формирования вихря, перенос пресной воды вдоль берега может быть сильно ослаблен, что ведет к накоплению пресной воды в самом вихре. Перенос стока вдоль берега связывают с числом Россби $Ro = U/fW$, где U , W , f – средняя скорость, ширина стока и параметр Кориолиса. Число Россби для скорости потока 0.5 м/с и его ширины $W = 5$ км составляет 1. Для низких значений числа Россби основной перенос стоковых вод происходит вдоль берега. Для больших значений числа Россби (около 1), происходит накопление пресной воды в вихре.

Наблюдения на заякоренных буях указывают, что характер приливных течений – неправильный полусуточный. Главная ось приливного эллипса для гармоники M2 у м. Укурунру составляет около 45 см/с. При этом приливной эллипс сильно поляризован с наклоном приблизительно вдоль берега. Важной особенностью является сильное ослабление приливных течений к верши-

не залива. Так, главная ось приливного эллипса для гармоники M2 на южном бье, находящемся на расстоянии 17 км от северного (см. положение буя на рис. 1) в 2 раза меньше, чем на северном. Прогрессивная векторная диаграмма указывает, что приливное смещение у м. Укурунру достигает 8 км.

Кроме антициклонического вихря во внутренней области залива Академии у выдающихся в море мысов формируются так называемые регулярные переходные вихри. Такие переходные вихри диаметром 5–40 км регулярно наблюдаются в прибрежных водах у м. Врангеля, Укурунру и Филиппа и играют значительную роль в дисперсии и динамике льда (рис. 3). Они формируются при отрыве приливного потока от оконечности мыса (Signell, Geyer, 1991). В результате отрыва потока от мыса генерируется завихренность, которая затем добавляется во внутреннюю область бассейна. Поэтому регулярные вихри могут играть важную роль в формировании внутреннего антициклонического вихря в заливе. Три параметра определяют отрыв потока и формирование регулярных вихрей у мыса: отношение размеров ширины мыса b и его протяженности a ; безразмерное число, характеризующее отношение силы инерции к силе придонного трения $H/C_D a$ где H – глубина, C_D – средний по глубине коэффициент сопротивления; и $U_0/\sigma a$ – где U_0 и σ – величина и частота приливного потока за пределами мыса.

Генерация вихрей за мысами наблюдается в самых разных условиях. Как правило, они связаны с осциллирующим приливным потоком. По разные стороны от мыса формируются вихри разного знака. Течения, связанные с развитием таких вихрей оказывают существенное воздействие на перенос осадков, льда и планктона. В случае, когда характерный масштаб вариаций берега сравним с приливным смещением, итоговое смещение льда и воды за приливной цикл сильно зависит от взаимодействия прилива с переходными

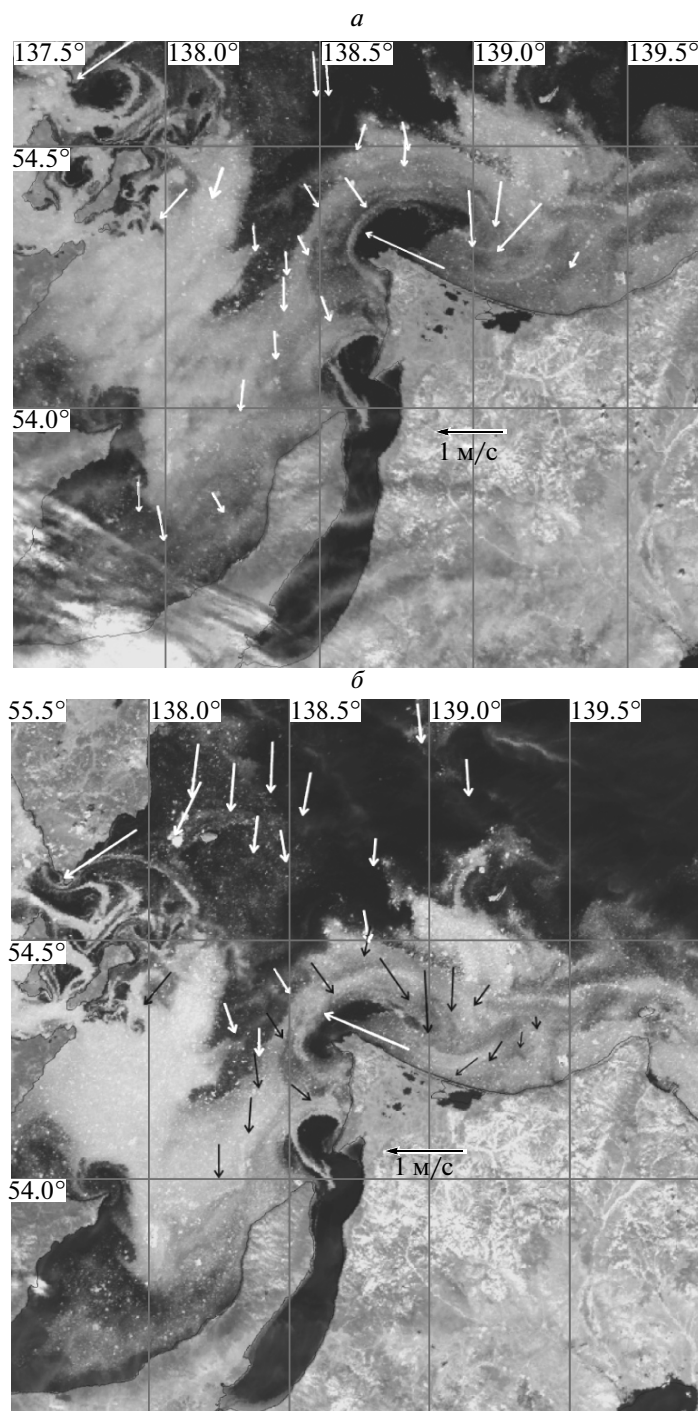


Рис. 4. *a* – Скорость дрейфа льда во время прилива у м. Врангеля и Филиппа по данным спутников Aqua и Terra 27 июня 2010 г. в 01:37. Конвергенция потока выражена у северного побережья м. Врангеля ($54^{\circ}20$ с.ш., $138^{\circ}40$ в.д.) благодаря формированию вихря у мыса; *б* – то же для времени 03:20.

вихрями, которые формируются в обе фазы прилива. Другая особенность, которая отличает формирование небольших вихрей от созданного приливом среднего потока – в степени концентрации завихренности. Во время прилива к юго-западу от м. Врангеля формируется циклонический вихрь. В этот же период к юго-востоку от м. Укурунру

формируется антициклонический вихрь меньшего размера. Антициклонический вихрь к северу от м. Врангеля формируется во время отлива, но сохраняется в период прилива. Это означает, что поток у мыса настолько силен, что может устоять против приливного потока, который его генерировал (рис. 4).

Векторы скорости течения в фазе прилива показаны на рис. 4. Максимальные значения скорости (около 113 см/с) наблюдались на северном побережье м. Врангеля. Вектор скорости параллелен берегу (294°T). На восточной стороне антициклонического вихря (на $139^\circ10'$ в.д.) векторы скорости со значениями 55–83 см/с были направлены к берегу. Ширина струи льда к северо-западу от м. Врангеля быстро сократилась с 14.1 до 8.1 км, т.е. на 43%, за время около 100 мин. Сокращение ширины полосы льда произошло в результате конвергенции потока. Такая конвергенция вызвана встречными течениями в пределах вихря. Вектор скорости на западной стороне струи с направлением 145°T достигал около 50 см/с, в то время как величина скорости встречного течения на северо-запад составила более 100 см/с. Похожая картина наблюдалась у м. Филиппа, где максимальная скорость вдоль берега достигала 104 см/с.

В системе координат, движущейся с потоком, дивергенция D определяется в виде

$$D = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt},$$

где A — площадь части потока, t — время. В обычном определении под конвергенцией понимают отрицательное значение дивергенции. Концентрация льда C либо сохраняющего свою глубину планктона, тогда связана с дивергенцией соотношением

$$D = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = -\frac{1}{C} \frac{dC}{dt}.$$

Концентрация льда уменьшается (увеличивается) экспоненциально со временем для постоянной дивергенции (конвергенции). Положение крупных льдин в разные моменты времени, разделенные интервалом около 100 мин, позволяет определить изменение площади A . За интервал времени между двумя изображениями на рис. 4а, б площадь участка между выбранными льдинами к северу от м. Врангеля сократилась со 163 до 94 км². Изменение площади выбранного участка позволяет определить масштаб времени экспоненциального роста сплоченности льда благодаря конвергенции потока, который составил 2.3 ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спутниковые изображения совместно с прямыми океанографическими наблюдениями использованы для исследования циркуляции вод в заливах Шантарского архипелага. Найдено, что у выдающихся в море мысов сильные приливные

течения формируют отрывной поток и регулярные вихри особого класса. Такие вихри важны, поскольку при взаимодействии с приливным потоком они образуют локальные области конвергенции. Формирование регулярных вихрей диаметром 4–40 км происходит за основными, далеко выступающими, мысами Шантарского архипелага. Существование таких вихрей связано с осциллирующим приливным потоком. При взаимодействии с приливом такие вихри создают локальные непродолжительные, но регулярные области конвергенции, оказывающие значительное воздействие на дрейф льда и его сплоченность. Интерес к областям конвергенции связан с их возможной ролью в концентрации не только льда, но и планктона, поскольку заливы являются местом питания полярных китов. Спутниковые наблюдения за дрейфом льда позволяют определить скорость конвергенции и ее положение относительно вихрей. Экспоненциальный рост концентрации льда достигается за время около двух часов.

Представленный анализ и результаты раскрывают океанографические условия, которые создают области конвергенции и, следовательно, могут определять концентрацию льда. Полученные практические результаты и оценки могут быть полезными при рассмотрении стратегии использования ресурсов и ожидаемого усиления судоходства в регионе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дорошенко Н.В.* Гладкие киты Охотского моря // Изв. ТИНРО. 1996. Т. 121. С. 14–25.
- Ivashchenko Y., Clapham P.* Bowhead whales *Balaena mysticetus* in the Okhotsk Sea // Mammal Rev. 2010. V. 40. № 1. P. 65–89.
- Signell R.P., Geyer W.R.* Transient Eddy Formation Around Headlands // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. P. 2561–2575.
- Kimura N.M. Wakatsuchi.* Relationship between sea-ice motion and geostrophic wind in the Northern Hemisphere // J. Geophys. Res./ Lett. 2000. V. 27. P. 3735–3738.
- Kimura N.M. Wakatsuchi.* Increase and decrease of sea ice are in the Sea of Okhotsk: Ice production in coastal polynyas and dynamic thickening in convergence zones // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. C09S03, doi: 10.1029/2003JC001901.
- Rogachev K.A., Carmack E.C., Foreman M.G.G.* Bowhead whales feed on plankton concentrated by estuarine and tidal currents in Academy Bay, Sea of Okhotsk // Contin. Shelf Res. 2008. V. 28. P. 1811–1826.
- Rogachev K.A., Carmack E.C., Salomatin A.S.* Strong tidal mixing and ventilation of cold intermediate water at Kashevarov Bank, Sea of Okhotsk // J. Oceanogr. 2000. V. 56. № 4. P. 439–447.
- Shcherbina A.Y., Talley L.D., Rudnick D.L.* Dense water formation on the northwestern shelf of the Okhotsk Sea: 1. Direct observations of brine rejection // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. C09S08, doi:10.1029/2003JC002196

Satellite Observations of the Headland Eddies Within Shantar Archipelago

K. A. Rogachev

V. I. Ill'ichev Pacific Oceanological Institute, Vladivostok

Sea ice used as a tracer for study of the convergence and circulation features in the Academy Bay, Shantar Archipelago in the northern Sea of Okhotsk. The region is rapidly warming likely resulting in ecosystem changes. Understanding of seasonal and inter-annual variability in the physical mechanisms influencing sea conditions are necessary to predict the impact of climate change. The present work combines satellite observations with physical measurements (CTD, currents and tides) Satellite data and in situ observations revealed anticyclonic eddies in the bays and regional cyclonic circulation in the shelf waters of the northwest Okhotsk Sea. Satellite images of sea ice distribution are used to provide synoptic illustration of tidally generated headland eddies. Broken ice images show convergence zones near headlands of the Academy Bay during flood.

Keywords: headland eddy, Academy Bay, Sea of Okhotsk, flow convergence