

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СТРУКТУРА ФРОНТА ПРИЛИВНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В РАЙОНЕ
ШАНТАРСКИХ ОСТРОВОВ (ОХОТСКОЕ МОРЕ) ПО ДАННЫМ
СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2012 г. И. А. Жабин*, В. А. Дубина

Учреждение Российской академии наук Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток

*E-mail: zhabin@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 31.05.2011 г.

Положение и сезонная изменчивость фронта приливного перемешивания в районе Шантарских островов исследованы на основе анализа спутниковых данных. Шантарский фронт приливного перемешивания относится к основным особенностям гидрологической структуры северо-западного шельфа Охотского моря в летний период. Фронт разделяет перемешанные приливыми течениями прибрежные воды и стратифицированную часть шельфа. Температурный фронт приливного перемешивания появляется в июле на фоне таяния ледяного покрова и исчезает в конце октября, когда разрушается стратификация. Среднее положение фронта меняется незначительно и определяется критическим значением параметра Симпсона–Хантера ($lgh/u^3 = 2.5$), фронт расположен над изобатой 50 м. Температурный фронт приливного перемешивания соответствует фронту в распределении хлорофилла *a*, рассчитанному по данным сканеров SeaWiFS и MODIS. Высокие, по сравнению со стратифицированной частью шельфа, концентрации хлорофилла *a* наблюдались в пределах зоны интенсивного приливного перемешивания. Спутниковые снимки в инфракрасном (ИК) диапазоне спектра (Landsat-5 TM) показали, что фронт является динамически неустойчивым. Эффекты перемешивания, связанные с фронтальными субмезомасштабными бароклинными вихрями, оказывают влияние на структуру стратифицированной части шельфа.

Ключевые слова: фронт приливного перемешивания, бароклинные вихри, распределение хлорофилла *a*, спутниковые данные, NOAA AVHRR, Landsat-5 TM, MODIS, SeaWifs, Охотское море, Шантарские о-ва

ВВЕДЕНИЕ

Приливы — один из основных источников энергии, который способен генерировать вертикальное перемешивание в океане. В мелководных районах океана (шельф, проливы, банки) с высоким уровнем диссипации кинетической энергии приливов за счет придонного трения могут формироваться перемешанные по вертикали стационарные зоны с резкими фронтальными границами, называемыми фронтами приливного перемешивания. Зоны интенсивного приливного перемешивания, ограниченные фронтами, являются важной особенностью структуры вод шельфовой зоны Мирового океана. К наиболее изученным районам интенсивного приливного перемешивания относится шельф северо-западной Европы (Simpson, 1981; Федоров, 1983).

На шельфе Охотского моря диссипативные потери суточной приливной волны K1 и лунной полусуточной приливной волны M2 составляют около 100 и 73 Гвт (1 Гвт = 10^9 вт) соответственно (Kantha et al, 1995; Le Provost, Lyard, 1997). Анализ спутниковых и океанографических данных позволил получить информацию о положении и сезон-

ной изменчивости зон интенсивного приливного перемешивания на северном шельфе Охотского моря (Жабин и др., 1990; Belkin, Cornillon, 2004). На спутниковых ИК-изображениях квазистационарные холодные зоны, ограниченные фронтами, наблюдались у Шантарских о-вов, в районе банки Кашеварова и на входе в зал. Шелихова. Эти районы отличаются высокими скоростями приливных течений и повышенными значениями скорости диссипации приливной энергии (Kowalik, Polyakov, 1998; Nekrasov, Romanenko, 2010). Стратификация вод в этих холодных зонах в летний период была существенно ослаблена или полностью разрушена.

В настоящее время спутниковая информация является одним из основных инструментов исследования океана. При этом многосенсорный подход можно рассматривать как наиболее перспективный метод исследования структуры и динамики океанологических процессов, протекающих в прибрежной зоне океанов и морей. В условиях сокращения морских экспедиционных исследований спутниковые данные становятся одним из основных источников информации для океанологических исследований в Охотском море.

Северо-западный шельф Охотского моря относится к числу наиболее продуктивных районов Мирового океана. Высокая продуктивность шельфа в летний период во многом обусловлена интенсивным приливным перемешиванием, обеспечивающим поступление биогенных элементов в верхний слой моря. Среди шельфовых зон интенсивного приливного перемешивания уникальными природными условиями и биоразнообразием выделяется район Шантарских о-вов, расположенный в юго-западной части Охотского моря (государственный природный заказник федерального значения). Исходя из этого, была определена цель работы: на основе анализа спутниковой информации, полученной в последние годы, исследовать особенности структуры и динамики вод одной из самых продуктивных морских экосистем Охотского моря, расположенной в районе Шантарских о-вов. При этом особое внимание было направлено на изучение динамических процессов, которые обеспечивают обмен свойствами между высокопродуктивными прибрежными водами и стратифицированной частью северо-западного шельфа Охотского моря.

ДАННЫЕ

Исследование структуры и динамики зоны интенсивного приливного перемешивания в районе Шантарских о-вов проводилось на основе анализа следующих видов спутниковой информации:

– ИК-изображения радиометра AVHRR ИСЗ серии NOAA, пространственное разрешение около 1 км (данные были получены из Центра коллективного пользования регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН – <http://www.satellite.dvo.ru/>);

– данные съемочной аппаратуры ТМ (Thematic Mapper – тематический картограф), установленной на спутнике Landsat-5 (<http://glovis.usgs.gov/>). Сенсор ТМ ИСЗ Landsat-5 получает данные на семи каналах. В шести из них: 1–5 и 7 (в видимом, ближнем и средних ИК-диапазонах) съемка проводится с пространственным разрешением 30 м. Данные канала 6 (в тепловом диапазоне) имеют разрешение 120 м. Ширина полосы обзора для всех каналов составляет около 185 км;

– значения концентрации хлорофилла *a*, рассчитанные по данным сканирующих спектро-радиометров SeaWiFS ИСЗ Seastar и MODIS ИСЗ Aqua, исходное пространственное разрешение 1 км, огрубленное пространственное разрешение 9 км, интервал осреднения – 1 мес. (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/>).

Анализ данных дистанционного зондирования морской поверхности позволяет исследовать термическую структуру вод зоны интенсивного приливного перемешивания у Шантарских о-вов (ИСЗ NOAA и Landsat-5), изменчивость фронтов,

проявляющихся на морской поверхности в поле температуры (ИСЗ NOAA и Landsat-5) и распределение хлорофилла *a* в продуктивных районах (ИСЗ SeaStar и Aqua).

На первом этапе работы был проведен выборочный анализ доступной спутниковой информации по району исследований, полученной в период с 2002 по 2010. Наибольшее количество свободных от облачности спутниковых изображений было получено в 2006 и 2007 гг. Кроме этого, в качестве дополнительной информации привлекались результаты численного моделирования приливных течений в Охотском море (Kowalik, Polyakov, 1998) и данные судовых измерений.

СТРУКТУРА ЗОНЫ ИНТЕНСИВНОГО ПРИЛИВНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ У ШАНТАРСКИХ О-ВОВ

По спутниковым данным (рис. 1 *a–в*) холодная зона в районе Шантарских о-вов формируется в начале июля на фоне последней стадии разрушения ледяного покрова, когда на соседних участках шельфа появляется термоклин. Положение фронта приливного перемешивания в период его существования меняется незначительно, фронт расположен приблизительно над изобатой 50 м. На примере Шантарского фронта можно показать, что сезонные изменения потока тепла через поверхность приводят к смене знака горизонтального градиента температуры на границах зоны приливного перемешивания, т.е. в период осеннего охлаждения (отрицательный поток тепла через поверхность моря) “холодная” зона приливного перемешивания превращается в “теплую” (рис. 1*в*). Это происходит потому, что относительно тонкий прогретый поверхностный слой (толщина около 10 м) стратифицированной части шельфа быстрее теряет тепло, а однородная по вертикали зона интенсивного приливного перемешивания (глубины до 50 м) охлаждается медленнее и постепенно превращается в более “теплую”, по сравнению со стратифицированными водами. После смены знака градиента температуры Шантарский фронт сохраняет свое положение. Термические контрасты в Шантарском районе прослеживаются до конца октября – начала ноября (начальная стадия льдообразования).

Результаты численного моделирования приливов Охотского моря (Kowalik, Polyakov, 1998, амплитуда и фаза приливных течений для полусуточной составляющей M2) были использованы для расчета параметра Симпсона-Хантера (Simpson, Hunter, 1974), критическое значение которого определяет среднее положение фронта приливного перемешивания (рис. 1*з*). Симпсон и Хантер предложили простую теорию фронтов приливного перемешивания, согласно которой фронт формируется там, где существует баланс между энергией, необходимой для полного верти-

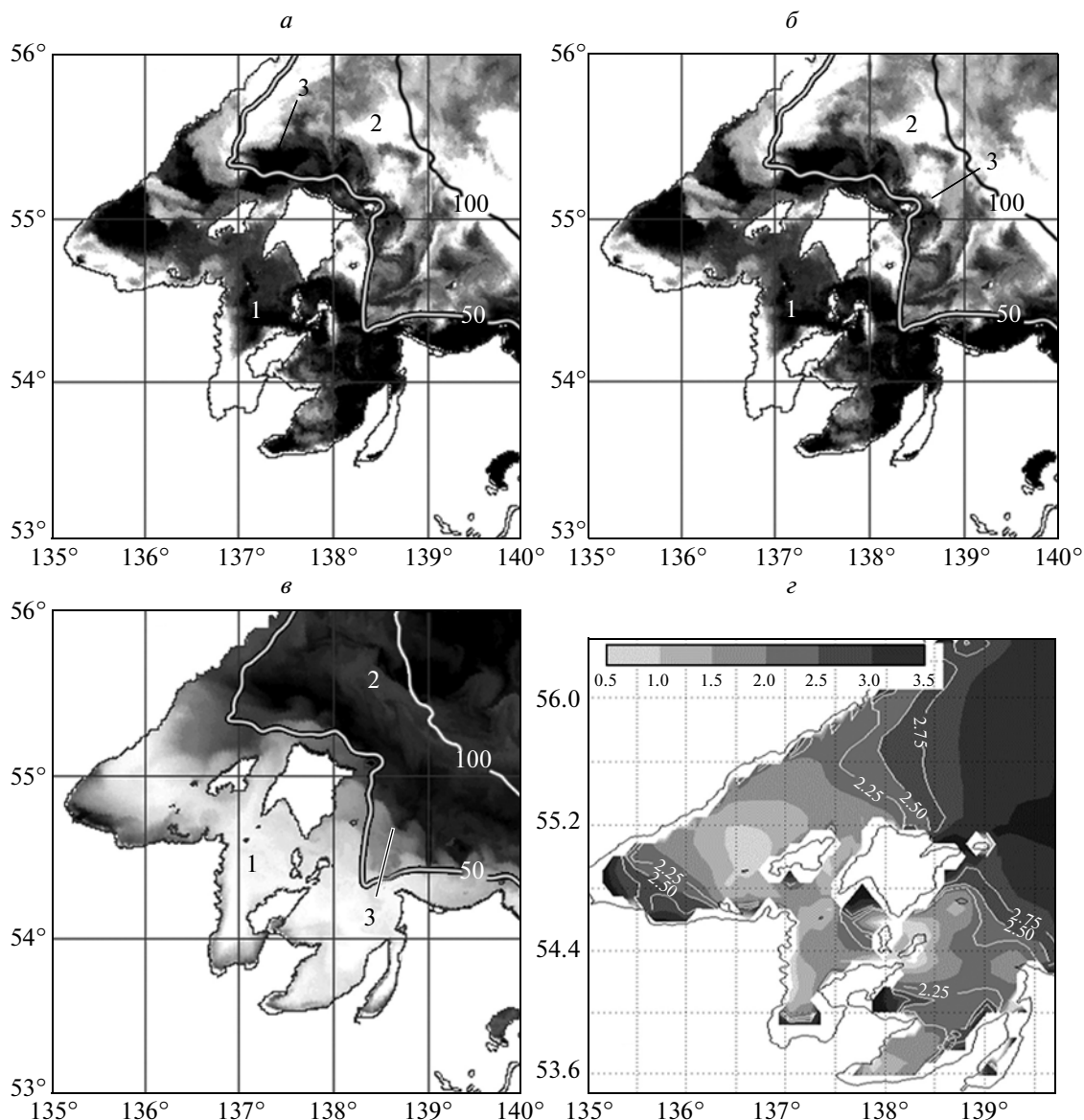


Рис. 1. ИК-изображения района Шантарских о-вов, полученные в 2006 г. (ИСЗ серии NOAA AVHRR): *а* – 17 июля, *б* – 4 сентября, *в* – 13 октября; и *г* – распределение параметра Симпсона–Хантера. Холодным водам соответствует темный тон изображения, теплым – светлый. На спутниковых изображениях показано положение изобат 50 и 100 м. Условные обозначения: 1 – воды зоны приливного перемешивания; 2 – стратифицированная часть шельфа; 3 – фронт приливного перемешивания.

кального перемешивания столба воды приливными течениями и энергией, требуемой для поддержания стратификации за счет поверхностного потока тепла (плавучести). Сопоставление карты распределения параметра Симпсона–Хантера и спутниковых ИК-изображений (рис. 1*а–в*) показывает, что критическое значение этого параметра $K = \lg H/U^3$ (H – глубина места, U – амплитуда приливного течения M_2) для Шантарского фронта приливного перемешивания равно 2.5, что соответствует диапазону значений (от 2 до 3), полученных для фронтов приливного перемешивания в других районах Мирового океана (Федоров,

1983). Последнее позволяет сделать обоснованный вывод о том, что Шантарский фронт относится к категории фронтов приливного перемешивания. Можно отметить, что положение фронта не зависит от величины и знака потока тепла через поверхность.

Среднее распределение хлорофилла *а* в районе Шантарских о-вов, рассчитанного по спутниковым данным, полученным в июле–октябре 2007 г. (спектрорадиометр MODIS ИСЗ Aqua, рис. 2), показывает, что в зоне интенсивного приливного перемешивания наблюдались высокие, для Охотского моря в целом, значения содержания хлоро-

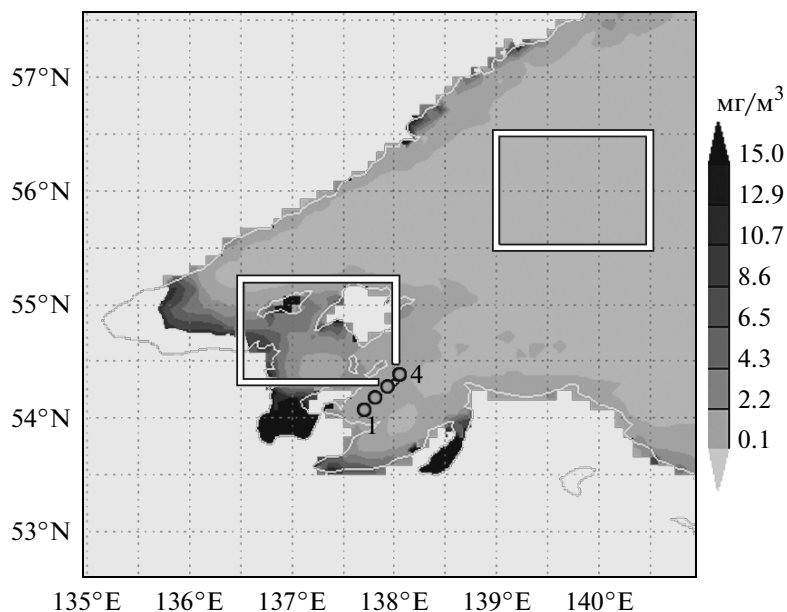


Рис. 2. Распределение хлорофилла *a* в районе Шантарских о-вов в июле—октябре 2007 г. (Aqua MODIS). На рисунке показано положение районов (прямоугольники), для которых рассчитывались средние концентрации хлорофилла *a* и положение станций, выполненных в зоне интенсивного приливного перемешивания в июле 2003 г.

филла *a*, который играет основную роль в процессе фотосинтеза. При этом концентрации хлорофилла *a* были повышены во всей области интенсивного приливного перемешивания, а не только в зоне фронта. Граница области с относительно высоким содержанием этого пигмента совпадала с положением фронта приливного перемешивания и не зависела от величины и знака горизонтального градиента температуры. Значения концентрации хлорофилла рассчитывались по алгоритму, разработанному для открытых районов океана (тип I). Этот алгоритм не может быть прямо использован для прибрежной зоны (воды типа II). В этом случае можно говорить о фронте в поле распределения хлорофилла *a*, положение которого совпадает с фронтом приливного перемешивания. В середине июля 2003 г на НИС “Академик Опарин” на четырех станциях были выполнены измерения концентрации хлорофилла *a* в зоне приливного перемешивания у Шантарских о-вов. Положение станций показано на рис. 2. Сопоставление судовых и спутниковых данных (сканер SeaWifs, ИСЗ Seastar, 12–18 июля 2003 г., <http://reason.gsfc.nasa.gov/OPS/Giovanni>) показало, что спутниковый хлорофилл *a* примерно в 2 раза превышает измеренные значения (1.66, 1.18, 1.02, 1.30 мг/м³ и 0.84, 0.51, 0.60, 0.86 мг/м³, соответственно для станций 1–4). Наблюдаемые различия связаны как с погрешностями стандартного алгоритма атмосферной коррекции, примененного для прибрежных мутных вод (Ruddick et al., 2000), так и с несоответствием алгоритма расчета концентраций хлорофилла *a* реальным биооптическим условиям зоны интенсивного

приливного перемешивания. По спутниковым данным (2002–2007 гг.), среднее содержание хлорофилла *a* в зоне приливного перемешивания (54.3°–55.2° с.ш., 136.5°–138.0° в.д., район, для которого выполнялись расчеты, показан в виде прямоугольника на рис. 2) в летне-осенний период (июль–октябрь) составляло 5.0 мг/м³ (SeaWiFS), или 4.6 мг/м³ (MODIS). На шельфе Охотского моря (55.5°–56.5° с.ш., 139.0°–140.5° в.д., рис. 2) за этот же период времени спутниковые концентрации хлорофилла *a* составляли 1.0 и 0.7 мг/м³ соответственно. Сравнение полученных оценок показывает, что продукция фитопланктона в зоне приливного перемешивания в несколько раз превышает продукцию стратифицированной части охотоморского шельфа.

Гидрологические наблюдения показали (Жабин и др., 1990), что в районе Шантарских о-вов приливное перемешивание приводит к существенному ослаблению и разрушению стратификации. В общем случае отсутствие стратификации должно уменьшать продукцию фитопланктона (уменьшение освещенности с увеличением толщины перемешанного слоя). Основным фактором, который обеспечивает высокую продукцию фитопланктона в зонах интенсивного приливного перемешивания, является регенерация биогенных элементов за счет разложения органического вещества. При этом биогенные элементы “размешиваются” приливыми течениями по всему столбу воды, обеспечивая тем самым условия для развития фитопланктона. Дополнительным источником биогенов для зоны интенсивного приливного перемешивания у Шантарских о-вов

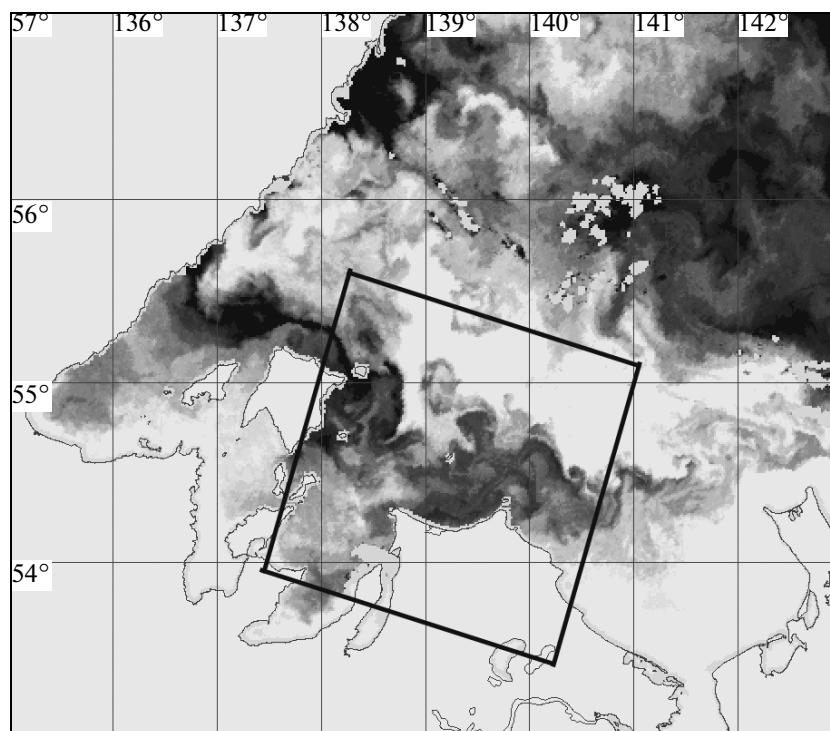


Рис. 3. ИК-изображение района Шантарских о-вов, полученное 20 сентября 2007 г. (NOAA-17 AVHRR). Прямоугольником представлены границы изображения Landsat-5 TM, представленного на рис. 4. Холодным водам соответствует темный тон изображения, теплым – светлый.

является речной сток. Гидрохимические измерения, выполненные в июле 2003 г. (станции 1–4) показали, что средние концентрации фосфатов, силикатов и нитратов на придонном и поверхностном горизонтах в зоне приливного перемешивания отличались незначительно (0.62 и 0.55 мкм, 2.8 и 2.5 и 0.6 и 0.5 мкм соответственно). Для стратифицированной части охотоморского шельфа летом характерны низкие концентрации биогенных элементов в прогретом поверхностном слое и высокое содержание биогенов в придонном холодном слое (шельфовые воды высокой плотности).

ДИНАМИКА ФРОНТА ПРИЛИВНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

В настоящее время динамика фронтов приливного перемешивания исследована в основном на основе численного моделирования. Результаты моделирования показали (Simpson, 1981), что с фронтом связано геострофическое течение, которое при определенных условиях становится неустойчивым и может генерировать субмезомасштабные бароклинные вихри. Бароклинные вихри могут определять обмен между высокопродуктивными водами зон интенсивного приливного перемешивания и стратифицированной частью шельфа (Badin et al, 2009). Модель показала, что вихревая активность увеличивается по мере уси-

ления вертикальной стратификации в результате летнего прогрева шельфовой зоны. Ветер не оказывает существенного влияния на процесс генерации вихрей на приливных фронтах.

Прямые инструментальные наблюдения динамических процессов в районах фронтов приливного перемешивания практически отсутствуют, что связано в первую очередь с пространственными (~1–10 км) и временными (1–10 сут) масштабами наблюдаемых явлений. Спутниковые данные позволяют получать информацию о поверхностных явлениях, связанных с динамическими процессами в зонах интенсивного приливного перемешивания, и могут быть использованы для проверки результатов, полученных при помощи численного моделирования. Анализ спутниковых снимков в ИК-диапазоне (ИСЗ NOAA-18, рис. 3) показал, что Шантарский фронт является неустойчивым, и на этом фронте могут генерироваться волновые возмущения и вихри. Кроме этого, вихревые структуры наблюдались в западной части Сахалинского залива, где вдольбереговое течение, связанное с фронтом, отделяется от побережья. Анализ спутниковых снимков высокого разрешения позволил в деталях рассмотреть структуру фронта на границе зоны интенсивного приливного перемешивания (ИСЗ Landsat-5, сканер TM, длинноволновый тепловой инфракрасный диапазон спектра, рис. 4). По спутниковым

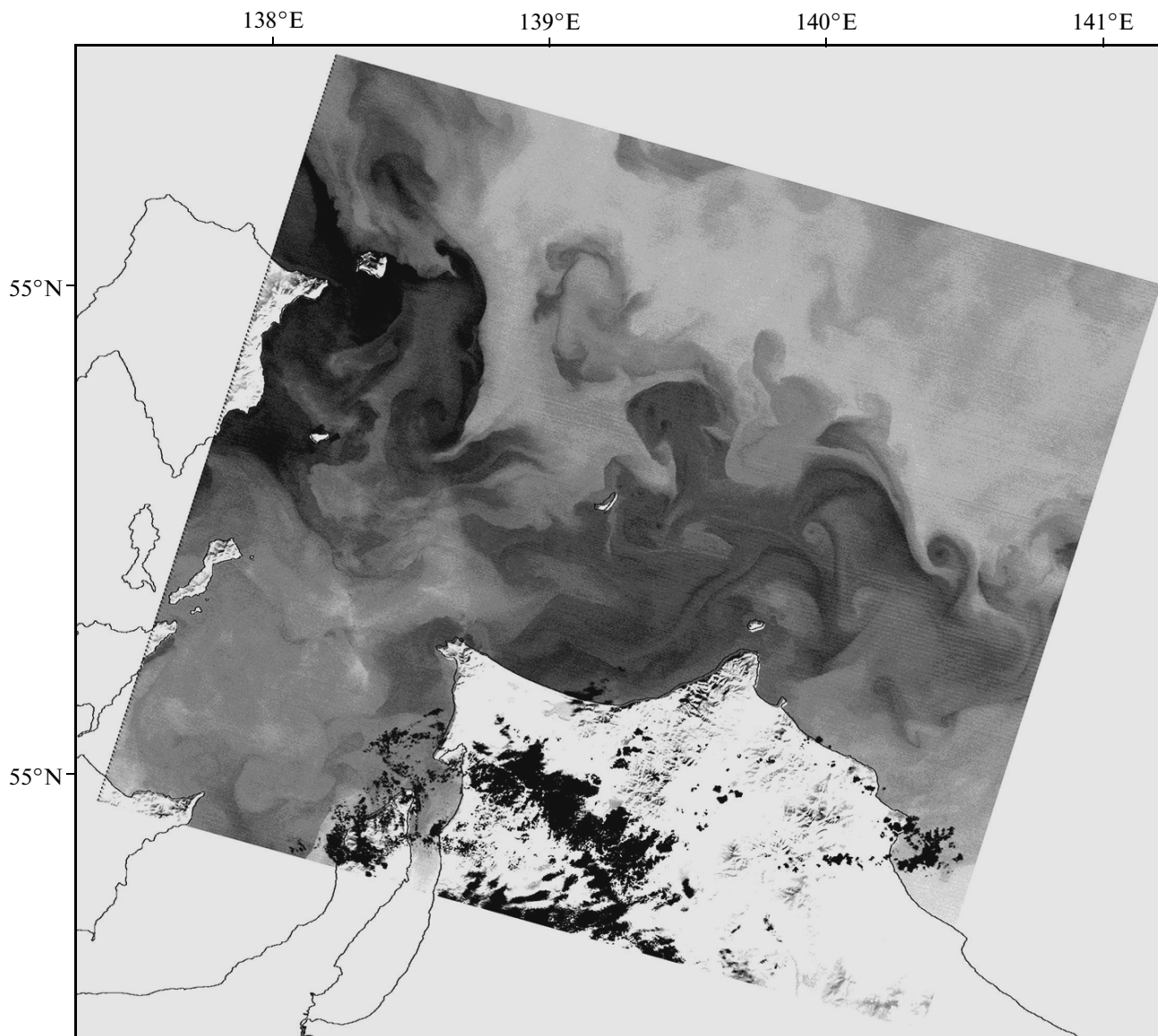


Рис. 4. Изображение района Шантарских о-вов в тепловом диапазоне, полученное 20 сентября 2007 г. (Landsat-5 TM). Холодным водам соответствует темный тон изображения, теплым водам – светлый.

данным, на фронте наблюдаются волновые возмущения (меандры) с длиной волны 15–20 км. Кроме этого, во фронтальной зоне формируются субмезомасштабные вихри, горизонтальный масштаб которых (~5–7 км) соответствует бароклинному радиусу деформации Россби (~3.5 км для стратифицированной части шельфа в районе Шантарских о-вов). Для расчета радиуса деформации использовалось выражение $L_D = (g'h_e)^{0.5}/f$, где f – параметр Кориолиса, $h_e = h_1 h_2 / (h_1 + h_2)$ (h_1 и h_2 – толщина верхнего и нижнего слоя), $g' = g(\rho_2 - \rho_1)/\rho_2$ – приведенное ускорение силы тяжести (g – ускорение свободного падения, ρ_1 и ρ_2 – плотность верхнего и нижнего слоя). По климатическим данным (<http://www.nodc.noaa.gov/OC5/>),

средняя толщина верхнего и нижнего слоя составляла 10 и 50 м, перепад плотности между слоями $\rho_2 - \rho_1 = 2 \text{ кг/м}^3$ соответственно. Параметр Кориолиса на широте Сахалинского залива равен $1.15 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Результаты расчета радиуса деформации Россби показывают, что наиболее вероятный механизм генерации вихрей – бароклинная неустойчивость фронта приливного перемешивания.

Субмезомасштабные вихри обеспечивают перенос биогенных элементов из зоны интенсивного приливного перемешивания (высокие концентрации биогенов в поверхностном слое) в стратифицированную часть шельфовой зоны. За счет этого процесса в указанной части шельфа, прилегающей к фронту приливного перемешивания, наблюдается повышенная продукция фитопланкто-

на (относительно высокие концентрации хлорофилла *a*, рассчитанные по спутниковым данным).

приливного перемешивания и соседними участками шельфовой зоны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По спутниковым данным уточнено положение и рассмотрена сезонная изменчивость термического фронта в районе Шантарских о-вов. Показано, что приливное перемешивание является основным структурообразующим процессом в этом районе. Сезонные изменения потока тепла через поверхность приводят к смене знака горизонтального градиента температуры на границах зоны приливного перемешивания, т.е. в период осеннего охлаждения “холодная” зона приливного перемешивания превращается в “теплую”. При этом положение фронта меняется незначительно. Рассмотрено влияние приливного перемешивания на распределение хлорофилла *a*, характеризующего концентрацию фитопланктона на северо-западном шельфе Охотского моря. Установлено, что по концентрации хлорофилла *a* в зоне приливного перемешивания у Шантарских о-вов в несколько раз выше, по сравнению со стратифицированной частью охотоморского шельфа. Приливное перемешивание способно обеспечить поступление биогенных элементов в фотический слой и тем самым поддерживать высокую продуктивность зоны интенсивного приливного перемешивания в летний период. На основе анализа спутниковых данных исследованы динамические процессы в зоне фронта приливного перемешивания у Шантарских о-вов. Установлено, что бароклинные вихри определяют трансфронтальный обмен свойствами между высокопродуктивными водами зоны интенсивного

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Жабин И.А., Зуенко Ю.И., Юрасов Г.И.* Поверхностные холодные пятна в северной части Охотского моря по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 1990. № 5. С. 25–28.
- Федоров К.Н.* Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
- Badin G., Williams R.G., Holt T.T., Fernand L.J.* Are mesoscale eddies in shelf seas formed by baroclinic instability of tidal fronts? // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. № C10021. doi: 10.1029/2009/JC005340. P. 1–18.
- Belkin I.M., Cornillon P.C.* Surface thermal fronts of the Okhotsk Sea // Pacific Oceanogr. 2004. V. 2. № 1–2. P. 6–19.
- Kantha L.H., Tierney C., Lopez J.W. et al.* Barotropic tides in the global oceans from a nonlinear tidal model assimilating altimetric tides. 2. Altimetric and geophysical implication // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. № C12. P. 25309–25317.
- Kowalik Z., Polyakov I.* Tides in the Sea of Okhotsk. J. Phys. Oceanogr. 1998. V. 28. P. 1389–1409.
- Le Provost C., Lyard F.* Energetics of the M2 barotropic ocean tides: an estimate of bottom friction dissipation from a hydrodynamic model // Progress in Oceanogr. 1997. V. 40. P. 37–52.
- Nekrasov A.V., Romanenkov P.A.* Impact of tidal power damps upon tides and environmental conditions in the Sea of Okhotsk // Continental Shelf Res. 2010. V. 30. P. 538–552.
- Ruddick K.G., Ovidio F., Rijkeboer M.* Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters // Appl. Opt. 2000. V. 39. № 6. P. 897–912.
- Simpson J.H., Hunter J.R.* Fronts in the Irish Sea // Nature. 1974. V. 250. P. 4004–4006.
- Simpson J.H.* The shelf-sea fronts: implication of their existence and behaviour. L.: Phil. Trans. R. Soc. 1981. Ser. A. V. 302. P. 531–546.

The Structure of the Shantar Islands Tidal Mixing Front According to Satellite Data

I. A. Zhabin, V. A. Dubina

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok

The location and seasonal variability of the tidal mixing front (TMF) around the Shantar Islands were studied using satellite data. The Shantar TMF is the dominant feature of the summer season hydrological structure of the north-western shelf of the Okhotsk Sea. It separates tidally mixed coastal waters from stratified open shelf waters. The TMF appear in July after ice melting when the thermocline is formed, and disappear in the fall (end of October) when the stratification is destroyed. This front showed a marked seasonal cycle and relatively constant position associated to the 50-m isobath. The mean positions are also compared to the distribution of Simpson and Hunter's (1974) tidal mixing parameter (critical value $(lgh/u^3 = 2.5)$). The positions of the TMF are correspond to temperature front. The thermal TMF around the Shantar Islands also is consistent with chlorophyll-*a* front detected by SeaWiFS and MODIS. As the front developed, higher chlorophyll *a* concentrations appeared in the coastal well-mixed water, in contrast to the seasonally-stratified water. Landsat TM infrared images of the TMF show evidence of dynamic instabilities. A mixing effects associated with frontal submesoscale baroclinic eddies bear a strong influence on the structure of the stratified shelf water adjacent to the Shantar Islands.

Keywords: tidal mixing front, baroclinic eddies, chlorophyll *a* distribution, satellite data, NOAA AVHRR, Landsat TM, MODIS, SeaWiFS, Sea of Okhotsk, Shantar Islands