

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ СИНОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ И ГЕОСТРОФИЧЕСКАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ ВОД ЯПОНСКОГО МОРЯ

© 2012 г. А. А. Никитин^{1*}, Г. И. Юрасов², Н. С. Ванин¹

¹Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр (ТИНРО-Центр), Владивосток
²Учреждение Российской академии наук Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, Владивосток

*E-mail: nikitin@tinro.ru; nikiti-alexandr@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.03.2011 г.

По осредненным данным многолетних судовых гидрологических измерений за 1925–2005 гг. и спутниковым изображениям за 1988–2002 гг. проведены исследования течений и вихрей в Японском море. На основании этих данных построены схемы геострофических течений и определено положение квазистационарных вихрей на поверхности моря. Показано, что вихревые образования сосредоточены вдоль струй основных течений. Предпринята попытка построения схемы поверхностных течений с учетом вихрей.

Ключевые слова: данные, спутниковые изображения, геострофическая циркуляция, вихри, течения, схема, Японское море

ВВЕДЕНИЕ

Японское море является одним из наиболее изученных бассейнов Мирового океана. В течение прошлого – начале текущего века научно-исследовательскими судами России, Японии, Кореи и США в пределах акватории Японского моря было выполнено огромное количество океанографических станций на глубинах 0–3500 м. Полученные данные использовались в издании многочисленных атласов, справочных пособий, монографий и статей по океанографии Японского моря. Наиболее полный массив данных по температуре и солености моря был использован для характеристики гидрологического режима моря (Лучин, 2003). В тоже время вопросы, связанные с динамикой вод, выпали из рассмотрения.

Расчеты течений Японского моря (Степанов, 1961), выполненные динамическим методом, были основаны на неполных данных многолетних измерений отечественных и японских судов, на основании которых удалось рассчитать течения только для трех сезонов года (лета, весны и зимы). Полученные схемы течений явились в дальнейшем тестовыми для оценки достоверности многочисленных диагностических и прогностических моделей.

Несмотря на достаточную изученность Японского моря, факты о проникновении теплолюбивой фауны рыб в северную часть Японского моря, а также наблюдающейся с конца 90-х годов прошлого столетия в южном Приморье продолжительной теплой осени, не могут быть объяснимы классической схемой течений (Яричин, 1980) (рис. 1). Совершенно ясно, что причиной увеличения численности теплолюбивых видов в Япон-

ском море, ранее неизвестных для вод Дальнего Востока тропических и субтропических видов животных, и в частности рыб, является значительное потепление вод, вызванное активизацией потоков теплых течений. Продление теплого периода (теплая осень) в районах среднего (43°–45° с.ш.) и (47° с.ш.) северного Приморья (м. Золотой) также можно объяснить поступлением субтропических вод из южных районов. С большой вероятностью это связано с горизонтальным теплообменом, обусловленным вихревыми образованиями, механизм передачи тепла которыми подробно рассмотрен в публикации (Никитин и др., 2002) одного из авторов настоящей статьи.

В середине 1980-х гг. многие исследователи стали использовать спутниковую информацию в исследовании течений и вихрей (Булатов и др., 1978; Булатов, 1980; Ichiye, Takano, 1988; Isoda, Saitoh, 1993; Isoda, 1994). На одной из первых схем (Ostrovskii, Hiroe, 1993), созданной на основе спутниковой информации, течения Японского моря показаны как совокупность вихрей. Поверхностная циркуляция Японского моря на этой схеме заметно отличается от ранее предложенной (Яричин, 1980), полученной на основе традиционных наблюдений. В течение последних 10–15 лет исследования фронтов и вихрей в Японском море развивались особенно активно в связи с широким применением в океанологии дистанционных методов измерений с искусственных спутников Земли (ИСЗ) и высокочувствительных судовых измерительных приборов. В результате этих исследований было установлено, что фронты и вихри встречаются здесь в широком спектре пространственно-временных масштабов и являются

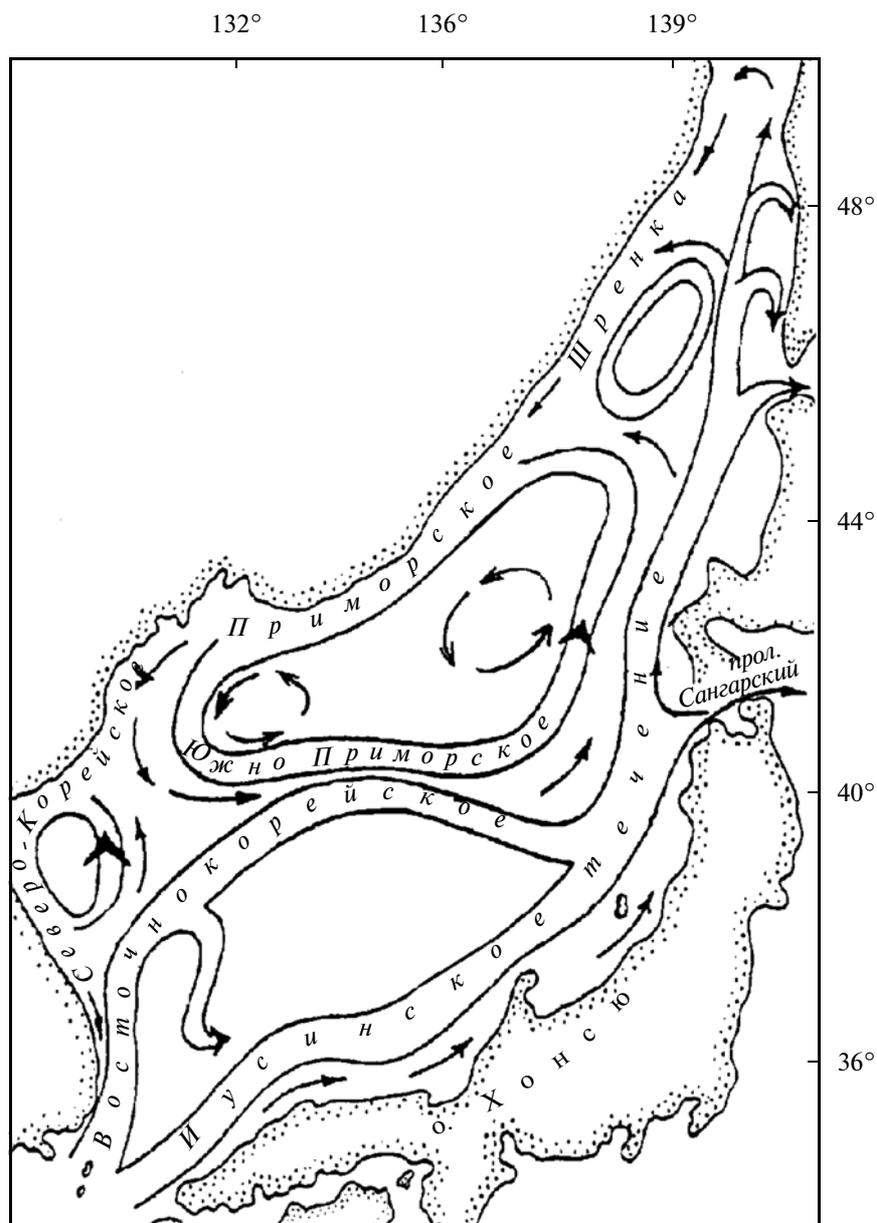


Рис. 1. Схема течений Японского моря по В. Яричину (1980).

важным элементом структуры и динамики вод как глубоководных, так и прибрежных районов. Спутниковая информация позволила детализировать некоторые участки поверхностной циркуляции вод Японского моря, особенно на участках, прилегающих к матерiku в зоне Приморского течения. Дальнейшие исследования на основе совместного анализа спутниковых данных за 1993–1994 гг. и траекторий буев 1992–1995 гг. ADCP- и СТД-зондирования (Гинзбург, 1998) позволило детально исследовать систему течений и квазистационарных вихрей Японского моря. Были представлены значения скоростей течений и основные пространственно-временные и кинематические

характеристики вихрей. Вихри можно рассматривать как замкнутые образования, переносящие воды с отличающимися от окружающих термохалинными признаками, т.е. вихри являются локальными образованиями фронтального типа. Поэтому исследование фронтов и вихрей позволило установить ареалы распространения водных масс, оценить их динамику, тепло-массоперенос, а также определить области повышенной биологической продуктивности, что актуально на современном этапе изучения освоения ресурсов Японского моря. Рациональное использование природных ресурсов прибрежных зон и увеличивающееся антропогенное

воздействие в этих областях требуют также углубленного изучения фронтов и вихрей. Кроме того, были определены районы формирования, их географическое положение, траектории и движения вихрей (Лобанов и др., 2007; Никитин, Юрасов, 2008). Было показано, что вихри и меандры могут переносить на большие расстояния воды с определенными характеристиками (Danchenkov et al., 1997; Lobanov et al., 1998; Никитин и др., 2002; Никитин, Харченко, 2002). И более поздние работы (Никитин и др., 2008) позволили приступить на основе как спутниковой, так традиционных исследований к созданию обобщенной схемы поверхностных течений, составленной с учетом влияния стационарных вихрей. Таким образом, исследования вихревой системы с использованием спутниковой информации, а также с привлечением синхронных подспутниковых судовых данных и измерений дрейфтеров по всей ее акватории, с выявлением и классификацией всех образований вихревого типа, их качественными и количественными характеристиками, динамикой, сезонной и межгодовой изменчивостью позволяет нам перейти к составлению обобщенной схемы течений с учетом стационарных синоптических вихрей, что является в настоящее время актуальной задачей как с точки зрения динамики, так и с позиции использования в практической деятельности в интересах рыболовства.

В настоящей работе была предпринята попытка сопоставления расчетных геострофических течений, построенных по гидрологическим данным для всех сезонов и поверхностных течений Японского моря, с построенными по данным спутниковой информации, и выявления их отличий.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

Для построения схем геострофической циркуляции использовался исторический массив глубоководных океанографических станций, сформированный из данных, имеющихся в информационных центрах России, Японии, Кореи и США, научно-исследовательские суда которых выполняли измерения температуры и солёности в Японском море в период с 1925 по 2005 гг. Методика построения среднемесячных полей рассмотрена в опубликованной статье (Гонтов, Юрасов, 1985). Расчет течений производился динамическим методом (Зубов, Мамаев, 1956). За отсчетную (нулевую) поверхность при расчетах течений выбран горизонт 1000 м.

Для анализа вихрей используются спутниковые инфракрасные (ИК) и телевизионные (ТВ) изображения Японского моря за 1988–2002 гг., сформированные в базу данных на магнитных носителях. В эту базу включены изображения, полученные радиометром высокого разрешения (AVHRR) как в режиме автоматической передачи (АРТ) с пространственным разрешением около

4 км, так и изображения, полученные радиометром высокого разрешения (HRPT) с разрешением около 1 км в Институте автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИАПУ ДВО РАН, г. Владивосток) и в Дальневосточном региональном центре приема и обработки данных (ДВ РЦПОД, г. Хабаровск). Также в информационный массив, начиная с 1999 г., включены данные регулярного приема аналогичной информации Межинститутского центра спутникового мониторинга, организованного на базе ИАПУ ДВО РАН (г. Владивосток). Основные положения методики обработки спутниковых снимков изложены в соответствующих работах (Булатов, 1984; Алексанин, Алексанина, 2006) и основаны на визуальном дешифрировании ИК-, ТВ-изображений, совместно с анализом судовых и синоптических данных. Основное внимание уделялось изучению таких элементов структуры, как положение, размеры, конфигурации отдельных вихрей; положение термических фронтов и горизонтальные градиенты температуры на них, положение и размеры меандров течений, отдельных ветвей и струй течений. На спутниковых снимках вихри диаметром более 20 км представлены как термические кольцевые или дугообразные образования, иногда с хорошо выраженной спиралевидной структурой.

Было привлечено около 1000 карт фронтологического анализа, построенных по данным спутниковых наблюдений. Обеспеченность спутниковыми данными по всей поверхности Японского моря была неравномерна: от нескольких изображений в сутки до полного отсутствия в течение 1–2 мес. Наибольшее количество карт построено в марте–мае и октябре–ноябре, наименьшее – летом в июле–августе. Наибольшая обеспеченность по годам приходилась на 1980–1982, 1985–1986, 1987 и с 1992 по 1996 гг. Наименее обеспеченным районом в Японском море являлся Татарский пролив.

Прежде чем перейти к обсуждению результатов, остановимся на факторах, обуславливающих термический режим того или иного сезона. В холодную половину года (зима, весна) в море наблюдается многообразие вихревых образований различных знаков и различных масштабов. Термическая структура моря в этот период хорошо прослеживается. Отметим, что основное влияние на термическую структуру моря оказывает адвекция вод. Поэтому различные элементы структуры (фронты, вихри, струи течений) прослеживаются на ИК-снимках довольно четко. В теплую половину года (лето и осень) за счет радиационного прогрева поверхностного слоя градиенты температуры воды на поверхности моря сглаживаются, и на ИК-снимках термическая структура прослеживается слабо.

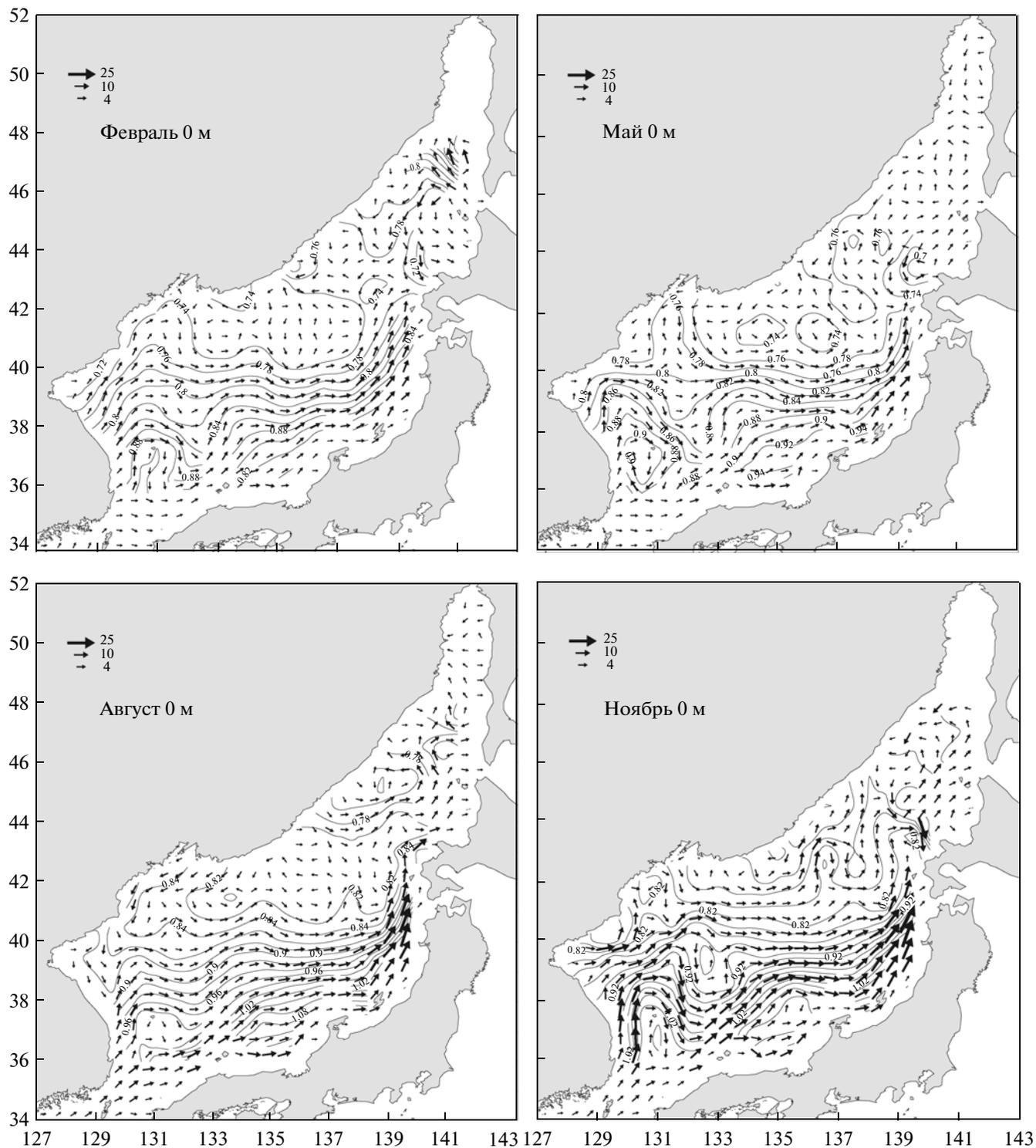


Рис. 2. Поверхностная циркуляция вод Японского моря в феврале, мае, августе и ноябре.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Геострофическая циркуляция по данным судовых наблюдений

На рис. 2 приведены схемы поверхностных течений Японского моря, рассчитанные динамиче-

ским методом относительно отсчетной поверхности 1000 м, в виде изолиний динамических высот и масштабированных векторов скорости для характерных месяцев каждого из сезонов года.

На схеме для зимы (февраль), поверхностная циркуляция в южной части моря (к югу от 40° с.ш.)

представлена известными теплыми течениями (рис. 2а). В ЮВ части моря, прилегающей к побережью о. Хонсю, от Корейского до Сангарского пролива распространяются со скоростями 10–20 см/с воды Цусимского течения. К сожалению, ветвь течения в непосредственной близости от побережья в масштабах заданной сетки не прослеживается, что в равной мере является причиной отсутствия в северной части моря прибрежного Приморского течения. В западной части моря распространяются воды Восточно-Корейского течения, которые втекают в море через западный проход Корейского пролива и далее распространяются к С вдоль побережья Корейского полуострова. По мере своего продвижения воды течения образуют меандры, первый из которых проявляется в пределах 38°–39° с.ш., где часть вод течения резко поворачивает на ЮВ, соединяясь в области около 37° с.ш., 132° в.д. с Цусимским течением, а также формируя антициклонический вихрь с центром на 37° с.ш.; 130.5° в.д. На широте 40° с.ш. часть вод Восточно-Корейского течения направляется на восток к Сангарскому проливу. К этой струе в районе банки Ямато присоединяются остальные воды Цусимского течения. Другая часть вод Восточно-Корейского течения в виде антициклонического меандра достигает 42° с.ш. в районе к ЮЗ от залива Петра Великого. Все ветви теплых течений соединяются у Сангарского пролива, и их часть покидает море, вытекая через пролив в Тихий океан, а оставшаяся вода распространяется к С вдоль побережья о. Хоккайдо к проливу Лаперуза. В зоне конвергенции ветвей отмечаются максимальные скорости течений. К В от северного меандра Восточно-Корейского течения в северной части моря (к северу от 40° с.ш.) и к З от вод потока теплых течений формируются два циклонических круговорота, наибольший из которых в широтном направлении распространяется до 43° с.ш. Далее к С от 43° с.ш. можно отметить обширный циклонический меандр в восточной части моря со значительными по величине скоростями течений, формирование которого обусловлено тем, что в зимний период времени сток вод через пролив Лаперуза отсутствует и поступающие в прибрежной зоне о. Хоккайдо воды из теплого сектора моря, достигая Татарского пролива, поворачивают к Ю.

В мае (рис. 2б) в основном сохраняются особенности циркуляции, отмеченные для февраля. Первый антициклонический меандр Восточно-Корейского течения более выражен, чем в зимний период, и достигает 40° с.ш., а второй, более слабый, достигает прибрежных вод Приморья. Циклонический круговорот к С от 41° с.ш. также ослаблен и представлен двумя циклоническими вихрями в области 133°–137° в.д. Северная граница круговорота ограничена 42° с.ш. Циклонический меандр в восточной части моря, к С от 43° с.ш., выражен в незначительном по площади локальном

районе к З от о. Хоккайдо. Антициклонический вихрь у побережья Кореи с центром в координатах 37° с.ш., 130.5° в.д. выражен отчетливо. Можно отметить, что в мае Приморское течение, направленное в ЮЗ направлении, выражено более отчетливо, так как достаточно удалено от берега.

В августе (рис. 2в) на фоне повсеместного увеличения скоростей течений, связанного с большим притоком вод из Восточно-Китайского моря через Корейский пролив, система течений моря значительно изменяется. Первый меандр Восточно-Корейского течения по сравнению с февралем, мае значительно ослаблен и с С ограничен 38° с.ш. Как и в зимне-весенний сезоны, антициклонический вихрь с центром в координатах 37° с.ш., 131° в.д. присутствует, хотя и в ослабленном виде. Исключая его, воды Восточно-Корейского и Цусимского течения от 40° с.ш. единым потоком распространяются в направлении Сангарского пролива. После сброса значительного объема вод через этот пролив в Тихий океан воды этих течений узким потоком следуют далее в направлении пролива Лаперуза. Часть северного потока поступает через пролив Лаперуза в Охотское море, а оставшаяся часть образует две ветви, одна из которых, после незначительного отклонения к З, поворачивает на В к побережью о. Сахалин и Западно-Сахалинским (Юрасов, Яричин, 1991) течением вытекает через пролив. Другая ветвь, отклоняясь к З, образует циклонический круговорот у побережья Приморья с центром в координатах 45° с.ш., 138° в.д. Западная огибающая этого круговорота представляет собой часть Приморского течения, которое в непосредственной близости к СЗ материковому побережью моря распространяется в ЮЗ направлении. К Ю от залива Петра Великого течение значительно усиливается и поворачивает к З за счет притока вод от северного звена циклонического круговорота, расположенного к С от 40° с.ш. Этот участок течения в монографии по течениям Японского моря (Юрасов, Яричин, 1991) назван Южно-Приморским. Южнее это течение переходит в Северо-Корейское, которое распространяется вдоль побережья Корейского полуострова до 38° с.ш., где, встречаясь с водами Восточно-Корейского течения, формирует фронтальный раздел и локальный циклонический вихрь с центром в координатах 39° с.ш., 129.5° в.д.

На ноябрьской схеме (рис. 2г) Восточно-Корейское течение по мере своего движения в северном направлении вдоль побережья Корейского полуострова разделяется на три ветви. Первая (восточная) ветвь на 39° с.ш. образует ярко выраженный антициклонический меандр, поворачивает в южном направлении и в координатах 37° с.ш., 133° в.д. соединяется с восточной ветвью Цусимского течения. Внутри меандра формируется антициклонический вихрь. Вторая (центральная) ветвь Восточно-Корейского течения поворачивает

ет на 39° – 40° с.ш. строго на В, и у Сангарского пролива соединяется с Цусимским течением. Здесь же присоединяется третья ветвь, которая образует антициклонический меандр, достигающий прибрежных областей моря к ЮЗ от залива Петра Великого. Воды этого меандра распространяются в южном направлении, соединяясь со второй ветвью течения в координатах 41° с.ш., 132° в.д. Следует отметить, что осенью крупный циклонический круговорот, расположенный к С от 40° с.ш., и Приморское течение в отличие от остальных сезонов не проявляются. В поле основных течений моря в осенний период отмечается ряд мезомасштабных меандров и вихрей, особенно хорошо выраженных на глубине 100 м (схема не приводится). Перечень этих образований включает: антициклонический вихрь диаметром около 200 км, центр которого находится в координатах 37° с.ш., 131° в.д.; антициклонический вихрь диаметром около 100 км с центром в координатах 37.5° с.ш., 135.5° в.д.; циклонический вихрь размером около 200 км с центром на 38.5° с.ш., 133.5° в.д.; антициклонический вихрь диаметром около 100 км с центром на 41.5° с.ш., 131° в.д. и циклонические меандры у С побережья Корейского полуострова и к З от о. Хоккайдо. Первый из указанных вихрей, как следует из изложенного выше, можно рассматривать как стационарный, так как он проявляется в течение всего года в одном и том же месте.

Поверхностная циркуляция и синоптические вихри Японского моря по спутниковым наблюдениям

В ноябре 2003 г. в СЗ части Японского моря была выполнена гидробиологическая съемка. Для уточнения деталей динамики вод прибрежной и глубоководной частей моря было подобрано несколько ИК-изображений со спутника NOAA за октябрь–ноябрь 2003 г. и из них выбрано одно. Спутниковое изображение за 19 ноября 2003 г. и геострофические течения на фоне динамической топографии (дин. см) относительно поверхности 1000 дб на горизонтах 0 м в ноябре 2003 г. представлено на рис. 3, из которого видно хорошее согласование спутниковых данных (рис. 3а) и расчетных (рис. 3б). Достаточно хорошо прослеживаются фронтальная зона между 42° – 43° с.ш., синоптический вихрь в южной части моря, затоки субтропических вод в прибрежную материковую часть Японского моря и крупные циклонические круговороты как на спутниковых изображениях, так и по расчетным данным. Однако на спутниковом изображении фронтальная зона представлена не как сплошная линия, а как множество вихрей разных знаков, вихрей закручивания, меандров и т.д. Из рисунка видно, что на хорошо выраженном участке фронтальной зоны (рис. 3а) наблюдаются максимальные геострофические скорости (рис. 3б), отмечаются высокие

градиенты температуры. Субарктический фронт, как видно на спутниковом снимке, в основном обнаруживается на северной периферии синоптических вихрей. Анализ Субарктического фронта по спутниковым данным показывает, что его СЗ и ЮЗ ветви и границы антициклонических вихрей существуют в неразрывном единстве. В ряде случаев границы вихрей отождествляются с СЗ и ЮЗ ветвями Субарктического фронта. Поэтому наблюдаемые фронты в Японском море являются границами (огигающими) для северных периферий вихрей. При этом Субарктический фронт деформируется вихревыми образованиями, в результате чего происходит нарушение его широтного положения.

Практически вдоль всей прибрежной материковой части Японского моря наблюдается апвеллинг, а также можно отметить множество мезомасштабных вихрей. Эти вихри в основном обнаруживаются, как и в нашем случае, в осенний период вдоль южного побережья Приморья до 45° с.ш. Их интенсификация и возможные контрасты, наблюдаемые по спутниковым ИК-изображениям, показали, что значительное перемещение вихря связано с сильными ветрами, вызывающими мощный апвеллинг вдоль побережья, и водообменом шельфовой зоны с открытым морем, что имеет важные биологические и экологические последствия (Лобанов и др., 2007; Lobanov et al., 1998).

Таким образом, мы видим хорошее соответствие спутниковых данных и расчетных. Представленный фрагмент ИК-изображения участка Японского моря, на котором достаточно хорошо видно положение термических фронтов, вихрей и основных течений, отражает известные из литературы основные черты динамики вод Японского моря. Тем не менее общая структура термических фронтов, течений и вихрей, выявленная по материалам спутниковой информации (или совместно со спутниковой), намного сложнее, чем это отмечается по гидрологическим данным. Такая сложная картина (а чаще еще более сложная), как на рис. 3а, прослеживается на всех космических снимках в течение последних 20–30 лет. По гидрологическим и частично спутниковым материалам выделены районы формирования вихрей в западной и южной частях Японского моря. Интересно, что значительная часть перечисленных выше исследований относится к вихрям, расположенным к Ю от Субарктического фронта. Это объясняется как большим количеством судовых наблюдений, так и резкими контрастами, позволяющими выделять вихри, используя спутниковую информацию.

Анализ спутниковых изображений показал, что в пределах акватории Японского моря районы наибольшей повторяемости синоптических вихрей во всех сезонах сохраняются (Никитин, Юрасов, 2008). Для создания уточненной схемы по-

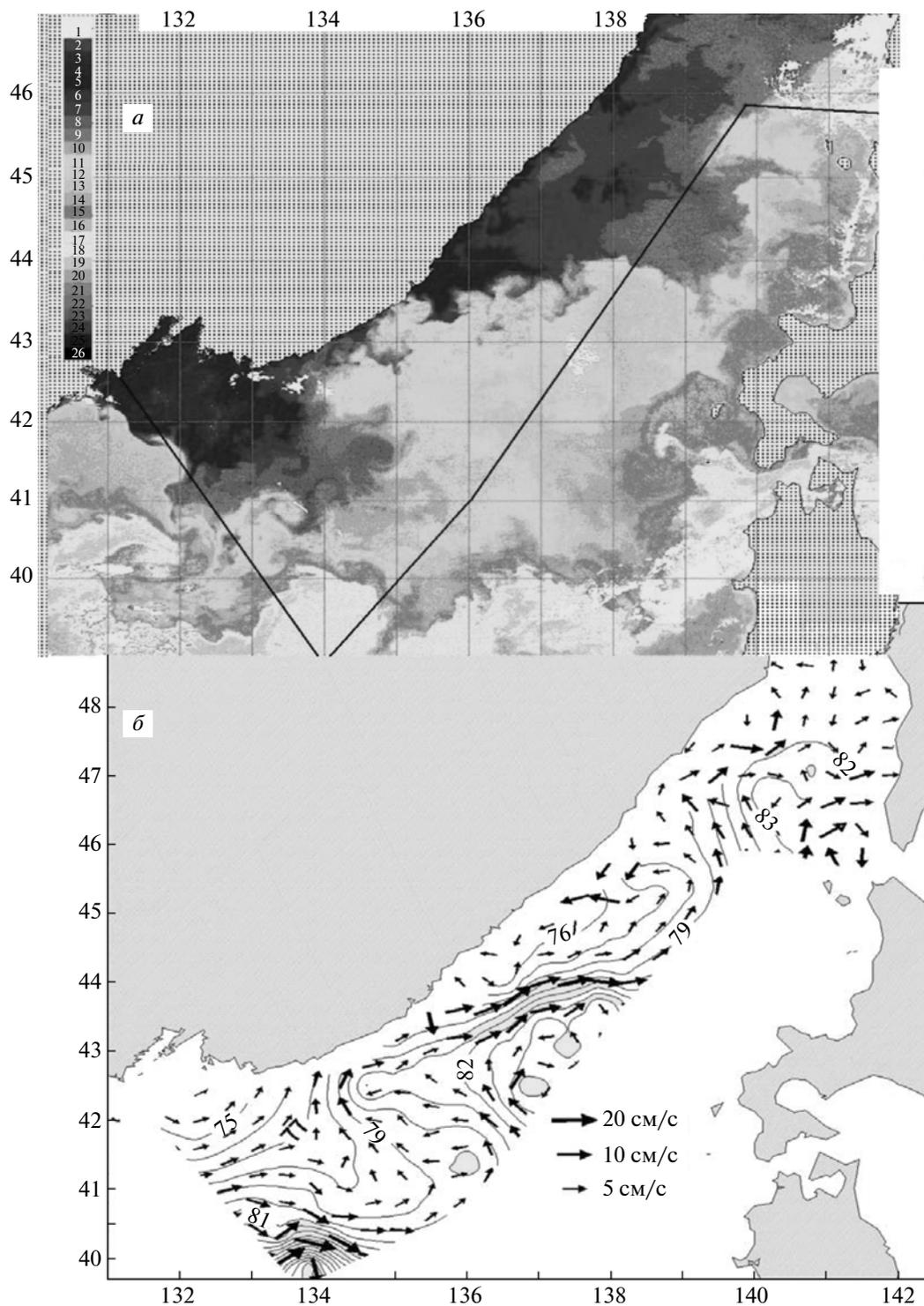


Рис 3. *a* – Спутниковое изображение за 19 ноября 2003 г.; *б* – геострофические течения на фоне динамической топографии относительно поверхности 1000 дб на горизонтах 0 м в ноябре 2003 г. На рис. 3а черной линией обозначена экономическая зона России в Японском море.

верхностной циркуляции Японского моря мы учитывали наибольшую повторяемость синоптических вихрей и их квазистационарное положение. Как видно на представленной схеме (рис. 4),

антициклонические вихри сосредоточены вдоль струй основных течений. Представлено семь квазистационарных антициклонических вихрей и один циклонический круговорот **Vk**, располо-

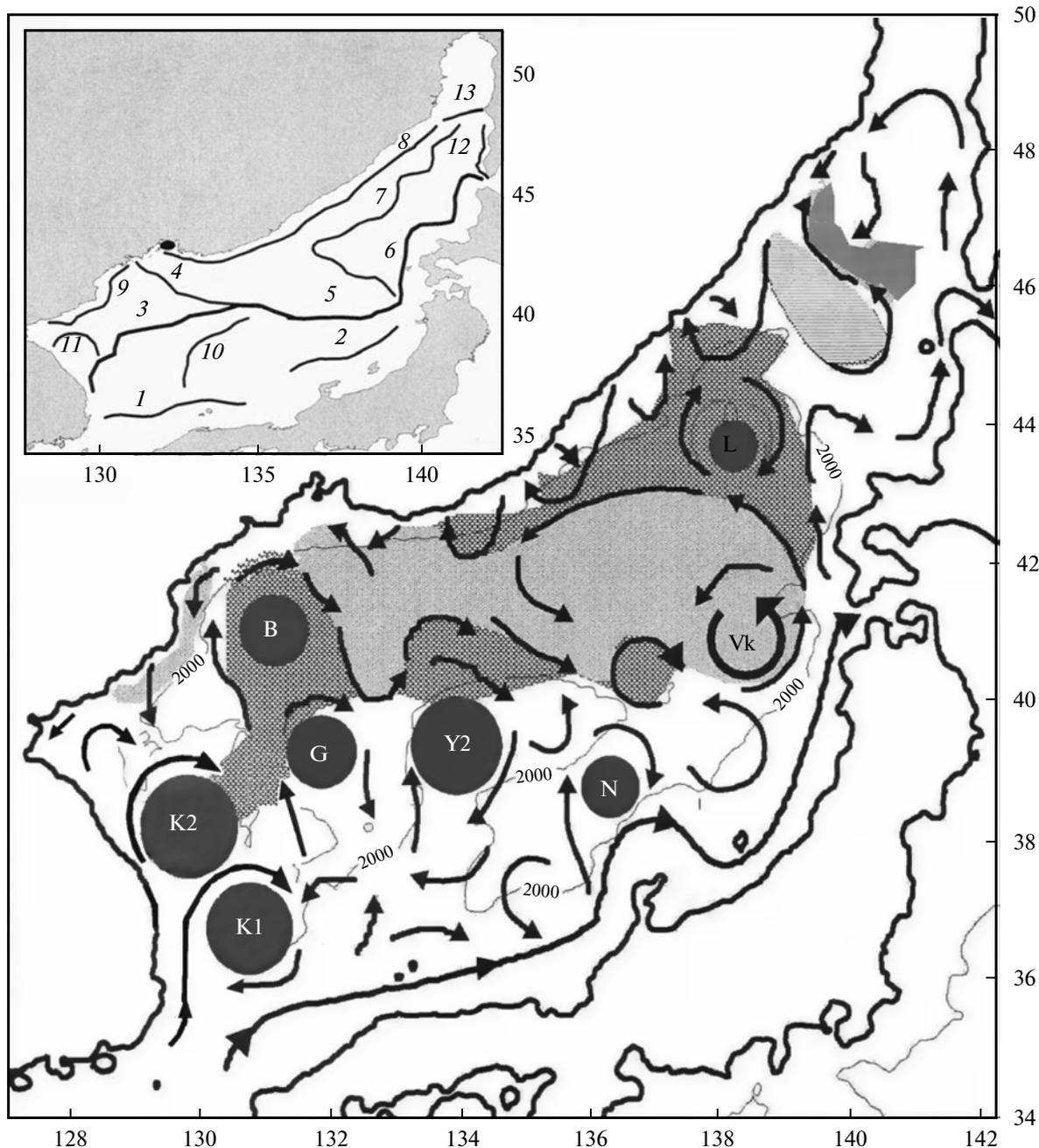


Рис. 4. Уточненная схема поверхностных течений в Японском море с учетом положения стационарных вихрей. Обозначения: **K1, K2, ...** (темно-серая область – тепло; светло-серая область – холод; стрелками показано направление основных течений). На вставке – обобщенная схема поверхностных термических фронтов в Японском море (Никитин, 2006). 5 – Субарктический фронт (САФ); 4 – СЗ ветвь САФ; 3 – ЮЗ ветвь САФ; 7 – С центральная ветвь САФ; 6 – СВ ветвь САФ; 1, 2 – фронты Цусимского течения (1 – южный фронт 1, 2 – южный фронт 2, ветвь Цусимского течения); 8 – Приморский фронт; 12 – Сахалинский фронт; 13 – фронт Татарского пролива; 9 – Северо-Корейский фронт; 11 – западный фронт.

женный в восточной части моря (Данченков, 2003). Районы, обозначенные темно-серым тоном, отражают теплые области, а светло-серым – холодные. Темные стрелки показывают известные течения Японского моря. Линии и стрелки отражают только положение и направление течений.

Антициклонические вихри в Японском море имеют характерные размеры 20–160 км. Вихри хорошо вписываются в циркуляционную систему вод Японского моря. Они расположены к Ю от залива Петра Великого (**B**), к З от Ямато (**G**), над возвышенностью Ямато (**Y2**), вдоль п-ова Кореи

Характеристика синоптических вихрей в Японском море в 1988–2007 гг.

| Вихрь | Координаты | Диаметр, км | Мощность вихря, м | Геострофическая скорость, см/с | Период наблюдения | Направление перемещения вихря | Поступательная скорость, км/сут | Время жизни, мес. |
|-----------|------------------------------|-------------|-------------------|--------------------------------|--|-------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| B | 41°15' с.ш., 131°10' в.д. | 50–110 | 2500 | | январь–май, октябрь, декабрь | ЮВ | 0.8 | 5 |
| G | 39°20' с.ш., 131°50' в.д. | 55–110 | 1000 | 20.5–23.3 | январь–май, август, октябрь–декабрь | СВ | | 9 |
| K1 | 36°50' с.ш., 130°45' в.д. | 65–130 | 360 | 24 | январь–декабрь | С, СВ | 0.5 | 12 |
| K2 | 38°20' с.ш., 129°50' в.д. | 55–160 | 350–500 | 30–60 | январь–июнь, август, октябрь–декабрь | С, СВ, СЗ | 0.6 | 30 |
| Y2 | 39°30' с.ш., 134°00' в.д. | 55–150 | 300–350 | 25.6 | январь, март–август, октябрь | Квazистационарный | | 7–8 |
| L | 43°50' с.ш., 138°30' в.д. | 20–75 | | 28 | январь–июль, октябрь–декабрь | ЮЗ, ЮВ | 0.2 | 7 |
| N | 38°50' с.ш., 136°20' в.д. | 50–95 | 400–450 | | январь, март–июнь, | СВ | | 5 |

(**K1**, **K2**), к С от п-ова Ното (**N**) и к З от о. Хоккайдо (**L**). Оставляя вопросы, связанные с циклоническими вихрями, на будущее, перейдем к рассмотрению параметров и эволюции антициклонических вихрей, представленных на обобщенной схеме. Основные характеристики вихрей, определенные с использованием ИК-изображений, приведены в таблице. Координаты вихрей, приведенные в этой таблице, относятся к начальному периоду их формирования. Анализ схем показывает, что отдельные вихри огибаются известными течениями Японского моря (Яричин, 1980). Новая схема также хорошо согласуется с положением поверхностных термических фронтов в Японском море (рис. 4, вставка) (Никитин, 2006).

Как видно на рис. 4, представленная схема отражает систему Восточно-Корейского течения с двумя квазистационарными вихрями **K1** и **K2** (таблица). Эти вихри наблюдаются в различные сезоны. Анализ судовых и спутниковых материалов показал, что вторжение субтропических вод происходит через переход из южного вихря (**K1**) в более северный вихрь (**K2**), ограничивается поверхностным слоем 0–75 м и поддерживает в последнем стабильный режим вод с термохалинными показателями — по нашим данным, 9.59°–10.87°С и 34.19–34.26‰ (Никитин, Дьяков, 1995). Этот вихрь, по данным (Shin et al., 1995; Shin et al., 2005), содержит ядро однородных по вертикали вод за счет зимнего конвективного перемешивания в слое 0–300 м с температурой 10°С и соленостью 34.2‰. В летний период ядро вихря накрывается слоем сезонного термоклина и приобретает черты внутритермоклинной линзы. Скорость течений в вихре варьирует от 30 до

60 см/с, а направление движения вихря меняется по часовой стрелке, от западного до СВ.

Цусимское течение представлено прибрежной ветвью и второй мористой ветвью. На периферии этого течения формируется квазистационарный вихрь **N** (севернее п-ова Ното), а в районе возвышенности Ямато — квазистационарный вихрь **Y2**. На ИК-снимках вихрь **N** проявляется отчетливо весной. Кинетическая характеристика этого вихря такая же, что и энергия вихрей в западной части моря. Диаметр этого вихря составляет примерно 90 км. Вихрь **Y2**, сформированный в районе возвышенности Ямато, удерживается ее топографией (отрогами) и является топографически захваченным (Isoda, 1994). Горизонтальные его размеры составляют 55–150 км, вертикальные — 350 м (таблица). Геострофическая скорость в весенний сезон может достигать 21.8–25.6 см/с, что согласуется с работами (Isoda, 1992; Isoda, 1994). Антициклонические вихри, расположенные севернее возвышенности Ямато, прослеживаются до 2500–3000 м и даже до дна по температуре и солености (Lobanov et al., 2001).

На новой схеме отражены вихревые дорожки вдоль 131° в.д., 134° в.д. и 137° в.д., по которым происходит перенос тепла в район южного Приморья (Никитин и др., 2002). Начиная с 1990-х гг., в южном Приморье наблюдается продолжительная теплая осень. Видно, что теплые воды широкой полосой проникают далеко на С вдоль 131° в.д. (рис. 5а). Продление теплого периода (теплая осень) наблюдается и в районах бухты Ольги (43° с.ш.) и м. Золотой (47° с.ш.), что также связано с затоком сюда субтропических вод из Цусимского течения по системе, связанной с вихревыми

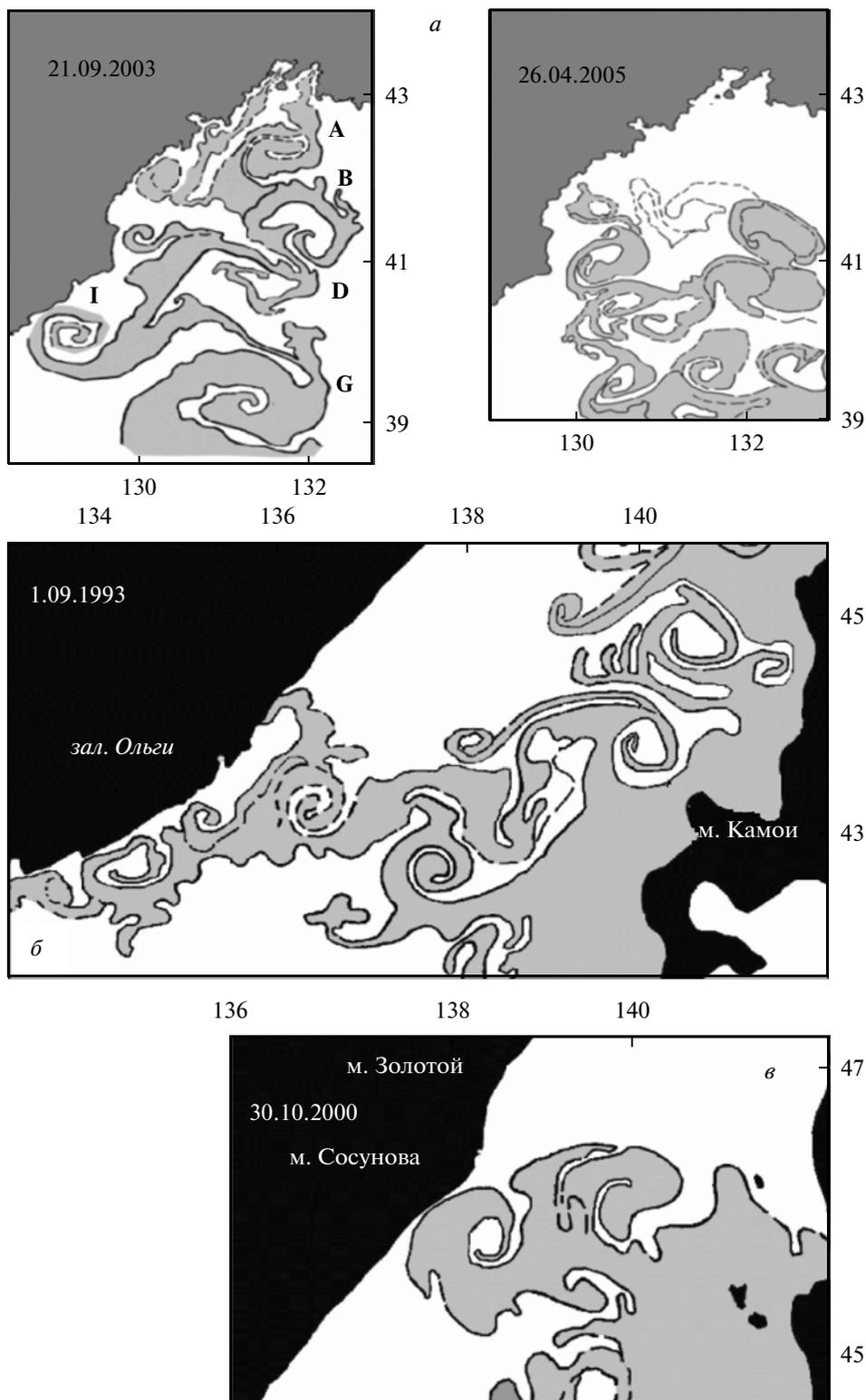


Рис. 5. Вихревые дорожки в СЗ части Японского моря: *a* – структура вихревой дорожки по 131° в.д. за 21 сентября 2003 г. и за 26 апреля 2005 г., **A, B, D, G, I** – синоптические вихри; *б* – вихревая дорожка вдоль 43° с.ш. СВ части Японского моря; *в* – вихревая дорожка вдоль 46° с.ш. в южной части Татарского пролива.

дорожками. Цусимское течение распространяется на С вдоль Японских островов. На траверзе о. Хоккайдо часть субтропических вод отделяется от Цусимского течения и отклоняется в сторону материка (рис. 5б). Видно, что этот поток в районе 136° в.д. разделяется на две ветви. Одна часть вод проникает на С в район бухты Владимира (44° с.ш.), а другая направлена вдоль побережья на ЮЗ. Далее на С в районе 46° – 47° с.ш. еще одна часть цусимских вод отклоняется в сторону м. Соунова и м. Золотой (рис. 5в).

Таким образом, выявленные по спутниковым данным своеобразные проникновения субтропических вод в район южного Приморья, а также в район бухты Ольги и м. Золотой являются термодинамическими особенностями динамики вод Японского моря.

В районе к Ю от залива Петра Великого наблюдается высокая повторяемость антициклонических вихрей (Никитин, Юрасов, 2008), что связано с формированием в этом районе вихря В (рис. 4). Под его влиянием происходят периодические изменения гидрологических условий в заливе Петра Великого. В результате теплые воды поступают с Ю из области фронта в виде струйного вторжения, распространяясь затем в северную часть залива. От этого вихря эпизодически отделяются мелкие вихри, которые или смещаются в сторону залива Петра Великого или перемещаются по его СВ периферии в ЮВ, В направлении. Исследования на 132 меридиане (Никитин, Дьяков, 1998) показали, что субарктические воды заглубляются перед субарктическим фронтом (САФ) и в межфронтальной зоне и далее распространяются в подповерхностном слое на Ю. Они затягиваются во вращательное движение водных масс, распространяясь в южном направлении по восточной периферии вихрей В и Г и обеспечивая транспортировку водных масс на Ю вплоть до южного фронта (38° с.ш.).

Вихрь L формируется в СВ части Японского моря приблизительно в координатах 44° с.ш., 138° в.д. (рис. 5б). Расчетная геострофическая скорость этого вихря составляет около 25 см/с, по данным дрейтера – около 23 см/с (Kim et al., 1996), а его диаметр – около 75 км (таблица). Вихрь практически не меняет свое местоположение (Park et al., 2004). Как известно, между 42° – 43° с.ш. прослеживается язык теплых вод, который простирается от о. Хоккайдо ветвью Цусимского течения на З к берегам материка (Данченков, 2003), образуя к С от САФ крупный циклонический круговорот. В водах этого языка продолжительное время могут прослеживаться синоптические вихри. Например, на ИК-снимках 11–12 декабря 2006 г. в восточной части моря наблюдался синоптический вихрь диаметром около 55 км (Никитин и др., 2009). Поверхностная температура воды в центре вихря составляла примерно 6 – 9°C . Он смещался в ЮЗ направлении со скоро-

стью 0.3 см/с. Вихрь прослеживался в течение семи месяцев – с 11.12.2006 г. по 14.06.2007 г. – и преодолел расстояние около 166 км. Можно предположить, что этот вихрь затягивался в область крупномасштабного циклонического круговорота над Японской котловиной и далее перемещался в нем. Наблюдаемые вихри являются источником формирования слоя промежуточных вод повышенной солёности в зоне к северу от САФ (Watanabe et al., 2004; Лобанов и др., 2007).

Формирование вихрей в южной части Татарского пролива может быть связано с прибрежной частью большого желоба, заходящего с Ю, образуя три ступени с уступами. Время жизни такого вихря по данным 2002 г. превышает семь месяцев (Никитин, Юрасов, 2008). Вихрь смещался в СЗ направлении по желобу между изобатами 1000 м со скоростью 0.9 см/с. Отметим, что наибольшая повторяемость антициклонических вихрей в южной части Татарского пролива наблюдается летом и осенью, т.е. в период максимального притока субтропических вод (Ванин, 2003). Именно в этот период в южной части Татарского пролива отмечалось кратковременное образование вихревых цепочек, состоящих из четырех–пяти мелких вихрей (Никитин, Юрасов, 2008).

Существование мезомасштабных вихрей к С от 40° с.ш. хорошо известно (Toba et al., 1984; Huh, Shim, 1987). Анализ дрейфа буев (Гинбург и др., 1998; Lee, Niiler, 2005) и результаты прямых измерений течений с помощью долговременных заякоренных систем (Takematsu, 1999) показали интенсивную вихревую динамику к С от субарктического фронта. Менее устойчивые вихри диаметром 40 – 70 км обнаруживаются в осенний период вдоль южного побережья Приморья до 45° с.ш. Анализ ИК-изображений показал, что формирование вихрей связано с сильными ветрами, вызывающими апвеллинг вдоль побережья, и водообменом шельфовой зоны с открытым морем. Это явление имеет важные биологические и экологические последствия (Lobanov et al., 1997; Лобанов и др., 2007).

Три наиболее холодных области, связанные с циклонической деятельностью (Яричин, 1980), на схеме представлены светло-серым тоном (рис. 4). Наиболее крупный циклонический круговорот расположен между субарктическим фронтом и 42° с.ш. и между 131° и 139° в.д. Центр этого круговорота (Vk) расположен в восточной части Японского моря (Данченков, 2003). Следующий циклонический круговорот значительно меньший по площади связан с Северо-Корейским течением. Еще один круговорот, уступающий по размерам первому, расположен в северной части Японского моря между 45° – 47° с.ш.

Приморское течение показано двумя отдельными звеньями, разделенными в районе 43° – 45° с.ш. (рис. 4), что может быть связано с выходом зоны

дивергенции на шельф Приморья (Sugimura et al., 1984; Yarichin, Ryabov, 1994). Отметим, что в районе 43° с.ш. направление береговой линии резко меняется, что должно оказывать влияние на прибрежные течения. Очевидно, что характер рельефа дна оказывает непосредственное влияние на физические процессы, протекающие в этом районе, и играет существенную роль в их развитии. На участке залива Петра Великого Приморское течение также не имеет единого потока. Вдоль побережья Приморья формируются небольшие вихри разных знаков. И только на С вдоль материка между 46° – 48° с.ш. хорошо отслеживается течение Шренка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ данных многолетних спутниковых наблюдений позволил составить уточненную схему поверхностных течений Японского моря с учетом существования квазистационарных вихрей, которая отличается от стандартной (Яричин, 1980) наличием циклонических и антициклонических вихрей, сосредоточение которых наблюдается вдоль струй основных течений. Предпринята попытка построения схемы поверхностных течений с учетом вихрей по судовым и спутниковым измерениям.

На фоне повсеместного увеличения скоростей течений, связанного с большим притоком вод из Восточно-Китайского моря через Корейский пролив, антициклонические вихри в Японском море испытывают значительную сезонную изменчивость, при этом максимальные скорости, диаметр вихрей и т.д. наблюдаются в летний период.

Синоптические вихри привязаны к стационарным течениям. Наиболее устойчивый антициклонический вихрь диаметром около 200 км, центр которого находится в координатах 37° с.ш., 131° в.д., можно рассматривать как стационарный, так как он проявляется как на спутниковых снимках, так и на картах геострофических течений в течение всего года в одном и том же месте.

Положение поверхностных термических фронтов в Японском море хорошо согласуется с представленной в настоящей статье уточненной схемой поверхностных течений. Некоторое исключение составляет летний период.

Выбранный масштаб осреднения данных многолетних судовых гидрологических наблюдений (полуградусная сетка) не позволяет выделять вихри меньших масштабов. Поэтому более мелкие вихри синоптического масштаба, выделенные по спутниковым данным, на расчетных картах поверхностных течений не могут быть определены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александров А.И., Александрова М.Г. Мониторинг термических структур поверхности океана по данным ИК-канала спутников NOAA на примере Прикурильского

района Тихого океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Вып. 3. Т. 2. М.: Азбука-2000, 2006. С. 9–15.

Булатов Н.В. Некоторые черты синоптической и межсезонной изменчивости в системе вод Куро-Сию по данным метеорологических спутников Земли (1974) // Тр. ДВНИГМИ. 1980. Вып. 80. С. 34–45.

Булатов Н.В. Рекомендации по использованию спутниковых ИК снимков в океанологических исследованиях. Владивосток: ТИНРО, 1984. 43 с.

Булатов Н.В., Луданник Л.А., Фукс В.Р. Мезомасштабное вихреобразование во фронтальной зоне Куро-Сию (по данным метеорологических спутников Земли) // Вестн. ЛГУ. 1978. №. 18. С. 87–94.

Ванин Н.С. Аномальные термические условия северо-западной части Японского моря осенью 2003 г. // Изв. ТИНРО. 2004. Т. 138. С. 345–354.

Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Островский А.Г. Поверхностная циркуляция Японского моря (спутниковая информация и данные дрейфующих буев) // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 1. С. 66–82.

Гонтов Д.П., Юрасов Г.И. Методика построения среднемесячных полей гидрофизических характеристик // Океанологические исследования в Тихом океане. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1985. С. 117–125.

Данченков М.А. Непериодические течения // Японское море. Т. 1. № 8. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 2003. С. 313–326.

Зубов Н.Н., Мамаев О.И. Динамический метод вычисления элементов морских течений. Л.: Гидрометиздат, 1956.

Лобанов В.Б., Пономарев В.И., Салюк А.Н., Тищенко П.Я., Тэлли Л.Д. Структура и динамика синоптических вихрей северной части Японского моря // Дальневосточные моря России. Океанологические исследования. М.: Наука, 2007. С. 450–473.

Лучин В.А. Гидрология вод // Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. У111. Японское море. 2003. Вып. 1. С. 157–256.

Никитин А.А. Основные черты пространственного распределения поверхностных термических фронтов в водах Японского моря и их изменчивость // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 5. С. 49–62.

Никитин А.А., Данченков М.А., Лобанов В.Б., Юрасов Г.И. Поверхностная циркуляция и синоптические вихри Японского моря // Современное состояние водных биоресурсов: Материалы научной конференции, посвященной 70-летию С.М. Коновалова. Владивосток: ТИНРО-центр, 2008. С. 601–604.

Никитин А.А., Данченков М.А., Лобанов В.Б., Юрасов Г.И. Новая схема поверхностной циркуляции Японского моря с учетом синоптических вихрей // Изв. ТИНРО. 2009. Т. 157. С. 158–167.

Никитин А.А., Лобанов В.Б., Данченков М.А. Возможные пути переноса субтропических вод в район Дальневосточного морского заповедника // Изв. ТИНРО. 2002. № 31. С. 41–53.

Никитин А.А., Дьяков Б.С. Эволюция антициклонического вихря в Японском море у берегов Кореи в системе вод Восточно-Корейского течения в 1991–1992 гг.

- (по данным спутниковой и судовой информации) // Исслед. Земли из космоса. 1995. № 6. С. 90–98.
- Никитин А.А., Дьяков Б.С. Структура фронтов и вихрей в западной части Японского моря // Изв. ТИНРО. 1998. № 124. С. 714–733.
- Никитин А.А., Харченко А.М. Типизация термических структур в Японском море и некоторые элементы их изменчивости // Изв. ТИНРО. 2002. № 131. С. 22–40.
- Никитин А.А., Юрасов Г.И. Синоптические вихри Японского моря по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 5. С. 1–16.
- Степанов В.Н. Общая характеристика гидрологии Японского моря // Основные черты геологии и гидрологии Японского моря. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 102–131.
- Юрасов Г.И., Яричин В.Г. Течения Японского моря. РАН ДВО. Владивосток, 1991. 190 с.
- Яричин В.И. Состояние изученности циркуляции вод Японского моря // Тр. ДВНИГМИ. 1980. № 80. С. 46–61.
- Danchenkov M.A., Nikitin A.A., Volkov Yu.N., Goncharenko I.A. Surface thermal fronts of the Japan Sea // Proc. CREAMS'97 Int. Symp. Fukuoka, Japan. 1997. P. 75–80.
- Huh O.K., Shim T. Satellite observations of surface temperatures and flow patterns, Sea of Japan and East China Sea, late March 1979 // Rem. Sens. Env. 1987. V. 22. P. 379–393.
- Isoda Y. Warm eddy movements in the eastern Japan Sea // J. Oceanogr. 1994. V. 50. № 1. P. 1–16.
- Isoda Y., Naganobu M., Watanabe H., Nukata K. Horizontal and vertical structures of a warm eddy above the Yamato Rise // Oceanogr. Res. 1992. V. 1. № 4. P. 141–151.
- Isoda Y., Saitoh S. The northward intruding eddy along the east coast of Korea // J. Oceanogr. 1993. V. 49. P. 443–458.
- Ichiye T., Takano K. Mesoscale eddies in the Japan Sea // La Mer. 1988. V. 26. № 2. P. 69–75.
- Kim K., Kim K.-R., Kim Y.-G., Cho Y.-K., Chung J.-Y., Choi B.-H., Byun S.-K., Hong G.-H., Yoon J.-H., Takematsu M., Volkov Y., Danchenkov M. New Findings from CREAMS Observations: Water Masses and Eddies in the East Sea // Korean Soc. Oceanogr. 1996. V. 31. № 4. December 1996. P. 155–163.
- Lee D.-K., Niiler P.P. The energetic surface circulation patterns of the Japan/East Sea // Deep-Sea Res.-2. 2005. V. 5. № 11–13. P. 1547–1563.
- Lobanov V.B., Danchenkov M.A., Nikitin A.A. On the role of mesoscale eddies in the Japan Sea water mass transport and modification // Oceanogr. 1998. V. 11. № 2. P. 46.
- Lobanov V.B., Nikitin A.A., Danchenkov M.A. New data on structure and evaluation of mesoscale eddies over the Japan Basin // CREAMS'97. January 26–28, 1997. Fukuoka, Japan. 1997. P. 12–13.
- Lobanov V., Ponomarev V., Tischenko P., Talley L., Mosyagina S., Sagalaev S., Salyuk A., Sosnin V. Evolution of anticyclonic eddies in the northwestern Japan/East Sea // Proc. 11th PAMS/JECSS-2001. 11–13 April 2001. Cheju, Korea. 2001. P. 37–40.
- Ostrovskii A., Hiroe Y. The Japan Sea circulation as seen in satellite infrared imagery in Autumn 1993 // Proc. CREAMS'94. Fukuoka, Japan. 1994. P. 75–88.
- Park K.-A., Chung J.-Y., Kim K. Sea surface temperature fronts in the East (Japan) Sea and temporal variations // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. № 7. L07304. doi: 10.1029/2004GL019424.
- Shin H.R., Byun S.K., Kim C. et al. The characteristics of structure of warm eddy observed to the northwest of Ullungdo in 1992 // J. Korean Soc. Oceanogr. 1995. V. 30. № 1. P. 39–56.
- Shin H.-R., Shin C.-W., Kim C., Byun S.-K., Hwang S.-C. Movement and structural variation of warm eddy WE92 for three years in the Western East/Japan Sea // Deep-Sea Res.-2. 2005. V. 52. № 11–13. P. 1742–1762.
- Sugimura T., Tanaka S., Hatakeyama Y. Surface temperature and current vectors in the Sea of Japan from NOAA-7/AVHRR data Remote sensing shelf sea hydrodynamics // Proc. 15 Int. Liege Sym. 1984. P. 133–147.
- Takematsu M., Ostrovskii A.G., Nagano Z. Observations of eddies in the Japan Basin Interior // J. Oceanogr. 1999. V. 55. № 2. P. 237–246.
- Toba Y., Kawamura H., Yamashita F., Hanawa K. Structure of horizontal turbulence in the Japan Sea // Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas / Ed. Ichiye T. Elsevier: Amsterdam, 1984. P. 337–332.
- Watanabe T., Hirai M., Yamada H. High-salinity intermediate water of the Japan Sea in the eastern Japan Basin // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № C6. P. 11437–11450.
- Yarichin V., Ryabov O. Current field structure of the Japan Sea in February-March 1990 // Proc. CREAMS'94 Int. Symp. 24–26 Jan. 1994. Fukuoka, Japan, 1994. P. 99–101.

Satellite Observations of Synoptic Eddies and Geostrophic Circulation of Waters of the Japan Sea

A. A. Nikitin¹, G. I. Yurasov², N. S. Vanin¹

¹Pacific Research Fisheries Centre (TINRO-Centre), Vladivostok

²V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok

On a basis of long-term hydrological observations for 1925–2005 and satellite images for 1988–2002 the studies of currents and eddies in the Sea of Japan are carried out. The schemes of geostrophic currents are constructed for all seasons and the locations of quasi-stationary of eddies at the sea surface are defined. It is shown that eddies are confined to the jets of the main currents. A generalized scheme of surface circulation including geostrophic currents and eddies defined from satellite images is presented.

Keywords: data, satellite images, geostrophic circulation, eddies, currents, scheme, Japan Sea