

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ПРИМОРСКОЕ ТЕЧЕНИЕ НА СТАНДАРТНЫХ РАЗРЕЗАХ И СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ ЯПОНСКОГО МОРЯ

© 2020 г. А. А. Никитин^а, *, Б. С. Дьяков^а, А. В. Капштер^а

^аТихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр (ТИНРО-Центр), Владивосток, Россия

*e-mail: aleksandr.nikitin@tinro-center.ru

Поступила в редакцию 14.06.2019 г.

В Японском море на основе совместного использования спутниковой и судовой информации проведен трехмерный анализ структуры Приморского течения в апреле–июне 2000–2017 гг. Спутниковые данные представлены изображениями поверхности моря в инфракрасном и оптическом диапазонах, а судовая информация – глубокowodными измерениями температуры и солености на съемках и стандартных океанографических разрезах. В результате данной работы дополнены современные представления о Приморском течении. Показано, что динамика вод Приморского течения имеет множественный характер.

Ключевые слова: Японское море, Приморское течение, спутниковые изображения, судовая информация, океанологические структуры, динамика вод, стандартный разрез, съемка, температура, соленость

DOI: 10.31857/S0205961420010078

ВВЕДЕНИЕ

Приморское течение рассматривалось Н.А. Белинским, Ю.В. Истошиным (1936) как сложная система круговоротов и местных завихрений, обусловленные конфигурацией береговой черты. В более поздних работах Ю.В. Истошин (1950; 1950а; 1975) указывал, что Приморское течение зарождается в Татарском проливе и в большей степени зависит от суровости предшествующей зимы. Скорость Приморского течения варьировала в пределах 30–40 см/с. Приморское течение к югу от залива Петра Великого, по данным Ю.В. Павлова (1958), разделяется на восточную и менее интенсивную западную ветвь, воды которой в отдельные сезоны достигают Восточно-Корейского залива. По данным А.К. Леонова (1960), Ю.В. Сизовой (1961) Приморское течение представляет собой естественное продолжение Цусимского течения. В Японском море, наиболее приближенной к действительности, стала схема циркуляции В.Г. Яричина (1980). В северо-западной части моря главные составляющие этой циркуляции – Приморское течение и его противотечение – Южно-Приморское, а в Татарском проливе – течение Шренка. В.Г. Яричин (1980, 1982) показал, что Приморское течение образуется в средней части Татарского пролива. Основной поток этого течения проходит на расстоянии от берега в 10–15 миль и придерживается внешней кромки материкового шельфа с максимумом скорости на горизонте 100 м. Было отмечено, что на

акватории залива Петра Великого Приморское течение является единственным устойчивым звеном горизонтальной циркуляции. В работе Г.И. Юрасов, В.Г. Яричин (1991) выдвинули предположение, что природа Приморского течения неразрывно связана с динамикой вод зоны апвеллинга. Приморское течение – это прежде всего вдольбереговое течение. Стрежень течения находится от береговой черты на расстоянии 30–40 миль. По предварительным данным, он не испытывает существенных колебаний, однако в весенний период отмечена тенденция приближения стрежня течения к побережью, а в осенний – отмечена тенденция вихреобразования в зоне течения. На стандартных океанографических разрезах Приморское течение идентифицировалось, главным образом, соленостным фронтом, что свидетельствовало о главном вкладе солености в формирование поля плотности. Причина изменчивости динамики вод Приморского течения заключалась, прежде всего, в колебаниях интенсивности северной ветви Цусимского течения. Мощность Приморского течения варьировала в диапазоне глубин 300–400 м (при отсчетной поверхности 500 дбар), а ширина потока изменялась от 10 до 35 миль (при расстоянии между станциями 10 миль). В летнее время в водах Южного Приморья Приморское течение не прослеживалось на поверхности моря, а распространялось на подповерхностных глубинах 50–100 м. Данное явление обусловлено, прежде всего, перераспределением плотности из-за

разных температур верхнего и нижнего слоев воды, или дрейфовой ветровой составляющей. В этот период Южно-Приморское течение подвергалось деформации вследствие проникновения в этот район антициклонических вихрей системы вод Цусимского и Восточно-Корейского течений. Есть мнение, что Приморское течение является потоком холодных опресненных вод менее 34.00‰ простирающегося вдоль побережья материка от Татарского пролива до залива Петра Великого (Данченков М.А., 2003). В работе (Дьяков, 2008) показано, что в холодные годы Приморское течение следует струйным потоком, а в теплые — геострофическая циркуляция состояла из серии циклонических круговоротов. В этом случае Приморское течение как пограничное течение Японского моря представлено западными звеньями циклонических круговоротов.

В середине 80-х гг. прошлого столетия многие исследователи в своих исследованиях стали использовать спутниковую информацию в изучении течений и вихрей (Isoda, Saitoh, 1993; Isoda, 1994; Булатов и др., 1978; Булатов, 1980; Ichiye, Takano, 1988; Никитин, Дьяков, 1995). Приморское течение на основе спутниковых данных, было представлено как совокупность вихрей (Ostrovskii, Yiroe, 1993; Никитин, Дьяков, 1998). Дальнейшее использование спутниковой информации позволило детализовать некоторые участки поверхностной циркуляции вод Японского моря, прилегающих к матерiku в зоне Приморского течения (Никитин, 2006; Никитин А.А., Юрасов, 2008; Рогачев, 2012; Ладыченко, Лобанов, 2013; Андреев, 2018). Исследования на основе совместного анализа спутниковых измерений за 1993–1994 гг. и траекторий буев в 1992–1995 гг. ADCP- и СТД-зондирования (Гинзбург и др., 1998) позволили исследовать систему течений прилегающую к матерiku в зоне Приморского течения, а также определить скорость Приморского течения, которая варьировала от 12 до 38 см/с.

Несмотря на достаточную изученность залива Петра Великого, базирующихся на многочисленных инструментальных и косвенных определениях, до сих пор нельзя сказать, что течения этой части Японского моря известны с достаточной полнотой. Такое положение объясняется сложным характером существующих течений, и их малой устойчивостью. К тому же открытая часть залива Петра Великого подвержена влиянию постоянного Приморского течения. Тем не менее, в летний период воды Восточно-Корейского течения проникают в залив Петра Великого, что было показано с использованием спутниковой информации высокого разрешения в работе Никитин и др., (2002а), где был предложен “механизм” адвекции субтропических (тихоокеанских) вод к берегам залива Петра Великого, который тесно связан с направлением и мощностью миграционных по-

токов пелагических рыб (дальневосточная сардина, анчоус, сайра, тихоокеанский кальмар), обитающих зимой в южной части Японского моря, который крайне важен для прикладных научных исследований и промысловых прогнозов. Также был разработан подход к типизации термических условий вод Японского моря, связанный с особенностями их динамики (Никитин, Харченко, 2002а). На основании данных спутниковых наблюдений за 1977–2002 гг. в среднегодовом плане было выделено 5 типов термической структуры вод, которые в общих чертах отражали характер гидрологического режима вод, и в большей степени зависели от адвективных факторов. В работе (Никитин и др., 2009) по осредненным данным многолетних судовых гидрологических измерений и спутниковым изображениям проведены исследования течений и вихрей в Японском море. Было показано, что вихревые образования сосредоточены вдоль струй основных течений.

На основе термогидродинамической модели было показано, что важным фактором в межгодовой изменчивости течений в северо-западной части Японского моря в теплый период года является изменение ветрового режима (Трусенкова, 2007). При преобладание циклонической завихренности усиливается циклоническая циркуляция вод в целом, в том числе холодных вод в южном направлении, а при антициклонической завихренности — наоборот происходит вихреобразование и усиленная адвекция теплых течений на север.

Колебания термодинамической структуры Приморского течения опосредованно могут влиять на степень поведения и распределения биологических объектов. Так, ареал приморской популяции терпуга и южно-приморской популяции минтая сформирован под воздействием Приморского течения, конфигурация, мощность и другие характеристики которого подвержены межгодовой и сезонной изменчивости. Кроме того, одна из субпопуляций приморской популяции терпуга постоянно расположена в зоне влияния Приморского течения (Вдовин, Измятинский, Соломатов, 2004).

В теплый период года Южно-Приморское течение, несмотря на устойчивый характер (Юрасов, Яричин, 1991), подвергается деформации вследствие проникновения в этот район антициклонических вихрей системы вод Цусимского и Восточно-Корейского течений. По данным спутниковых наблюдений, поток Приморского течения на участке 43°–44° с.ш. претерпевает сильные изменения, может прерываться, менять направление на противоположное или представлять собой вихревые разнонаправленные потоки.

Поэтому в настоящей работе авторы, используя накопленный большой объем спутниковой и

гидрологической информации, а также приобретенный нами опыт, попытались систематизировать сложную многомерную картину состояния и движения вод Приморского течения, выделить их особенности на фоне термодинамических условий, исследовать их изменчивость в северо-западной части Японского моря в весенний период 2000–2017 гг. и, возможно, создание современной концепции этого течения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Спутниковые данные. Изображения со сканеров AVHRR (спутников серии NOAA) и MODIS (спутники Terra и Aqua) в инфракрасном диапазоне спектра получены в апреле–июне 2000–2017 гг. в Институте Автоматики и Процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИАПУ ДВО РАН, г. Владивосток) и Дальневосточном региональном центре приема и обработки данных (ДВ РЦПОД, г. Хабаровск). Пространственное разрешение изображений для сканеров Modis (спутники Terra и Aqua) составляли 1 км, а для NOAA – около 1.1 км. 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 и размеры Приморского течения, отдельных ветвей, струй и меандров течений, положение, размеры, конфигурации отдельных вихрей; положение термических фронтов и горизонтальные градиенты температуры на них.

Океанографические (судовые) данные. Материалы измерений температуры и солёности на океанографических съемках и стандартных разрезах “Сангарский” и “132° в.д.”, которые выполнялись научно-исследовательскими судами ФГБНУ “ТИНРО-Центр” в северо-западной части Японского моря в период апреле–июне 2000–2017 гг. Глубина зондирования составляла 500 м. При обработке этих данных применялись стандартные океанографические программы. В нашем случае судовая информация рассматривалась только с точки зрения типизации океанографических условий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Термодинамическая структура вод Приморского течения

Термодинамическая структура вод Приморского течения рассматривалась на примере наиболее характерных ситуаций, наблюдаемых по спутниковым данным и океанографической информации в весенние сезоны (апрель–июнь) 2000–2017 гг. Совместное использование спутниковой и океанографической информации позволило провести

трехмерный анализ океанографических структур (течений, фронтов и их разделов, антициклонов и водных масс). В результате этой работы предполагалось типизировать весенние сезоны в 2000–2017 гг. на три группы по термодинамике вод и положению океанографических структур на спутниковых картах и океанографических разрезах – “холодный”–“теплый”–“нормальный” (Никитин, Дьяков, Капштер, Нуждин, 2018), где доминирующим признаком типизации является термическое состояние вод. Однако ни один из рассмотренных лет в период апрель–июнь 2000–2017 гг. не вошел в “холодный” тип. Поэтому в данной работе мы рассмотрим только термодинамическую структуру вод Приморского течения, проявляющуюся в “теплый” и “нормальный” типы лет, а также выделим их особенности с учетом спутниковых и судовых наблюдений.

Приморское течение в апреле–мае

На рис. 1 представлены ИК-изображения Приморского течения в апреле 2015 г. и в мае 2016 г. По термодинамическому состоянию вод северо-западной части моря оба года относятся к “нормальному” типу лет. Мы видим, что Приморское течение в эти годы отчетливо проявлялось на спутниковых картах, и было представлено единым потоком шириной 20–60 км, проходило вдоль всего материка и хорошо прослеживалось на всем протяжении Южного Приморья, вплоть до 40°30' с.ш. Наиболее его холодные воды отмечались к северу от 43°–44° с.ш., где отчетливо проявлялся его стрежень, а также в заливе Петра Великого.

В заливе Петра Великого Приморское течение представлено единственным устойчивым звеном горизонтальной циркуляции. К северу от 43° с.ш. в 30–40 км от побережья отчетливо выделялся фронт Приморского течения, на границе которого формировалось множество мелких меандров и вихревых образований. Как видно на рис. 1б, в, д, е, к северу от 43° с.ш. в область Приморского течения вторгаются отдельные теплые струи, потоки. В результате на этих участках Приморское течение или его отдельные струи могут изменять направления движения, а на их границе – формироваться множество вихрей различного знака. И, несмотря на сходный характер термического режима вод, структура Приморского течения в эти годы имеет различия.

В апреле 2015 г. наиболее холодные воды Приморского течения, причем однородные по температуре, проявлялись в заливе Петра Великого от –0.1 до 0.3°С, а к северу от 44° с.ш. от –1.0 до –1.5°С соответственно (рис. 1а). Спутниковое изображение показывает узкую вдоль береговую полосу относительно теплых вод (2–3°С) в Амурском и Уссурийском заливах. Стрежень При-

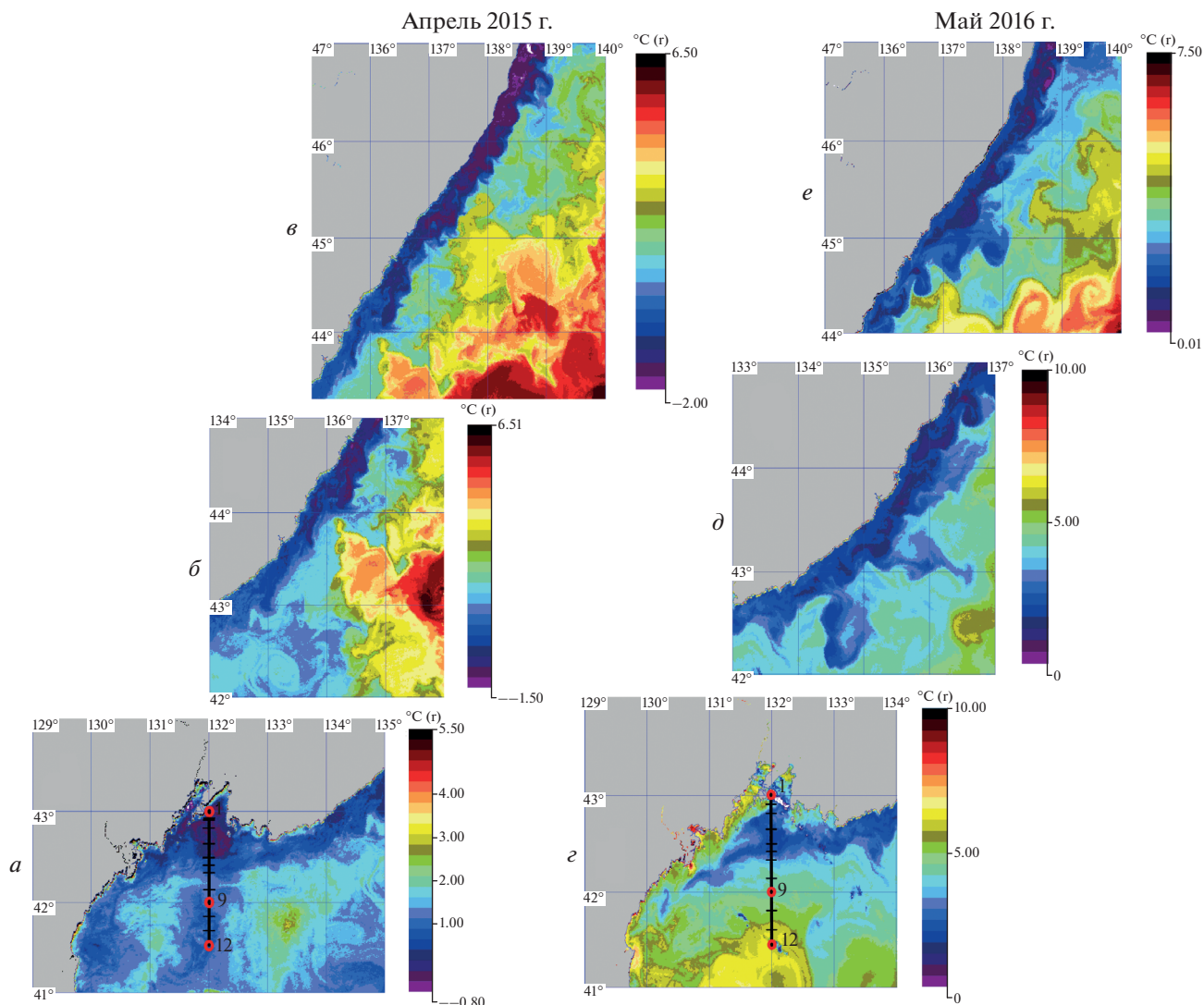


Рис. 1. Приморское течение (Японское море) на спутниковых ИК-изображениях 1 апреля 2015 г. и 7 мая 2016 г. (NOAA-15 AVHRR). Примечание: *a, z* – Приморское течение в районе южного Приморья (к югу от залива Петра Великого); *б, д* – Приморское течение в районе среднего Приморья; *в, е* – Приморское течение в районе северного Приморья; *1–12* – разрез по 132 меридиану.

морского течения наиболее четко проявлялся к северу от 44° с.ш. вблизи побережья. Приморское течение имело наибольшую ширину примерно 30 миль, к югу же ширина течения уменьшалась до 15–20 миль, а в районе м. Поворотный – примерно 10–15 миль. Вдоль восточной границы течения четко выделялся фронт Приморского течения с перепадом температуры воды на севере в районе м. Золотой от -1.5 до 2.5°C и от 0.5 до 1.5°C на юге в районе м. Поворотный. На всем его протяжении формировалось множество мелких меандров и вихревых образований различных знаков. Со стороны Цусимского течения между 43° – 44° с.ш., вдоль 45° и 46° с.ш. очень хорошо прослеживалось в западном направлении движение теплых потоков (меандры), в результате чего

Приморский фронт наиболее четко проявлялся именно в районах их соприкосновения с холодными водами Приморского течения (рис. 1*a*). В качестве подтверждения и более ясного понимания происходящих термодинамических процессов в области Приморского течения использовался океанографический разрез по 132° в.д. (рис. 2). Мы видим, что в 2015 г. Приморское течение в заливе Петра Великого отражалось на станциях №№ 6–8 как по температуре, так и по солености. Наиболее низкая соленость (менее 33.66‰) наблюдалась в верхнем 20-метровом слое. Видно, что по свалу глубин идет опускание холодных придонных вод (-0.5°C), которые образовались в заливе Петра Великого в зимний сезон. *T,S*-кривые станций №№ 1–12 показали наличие северной

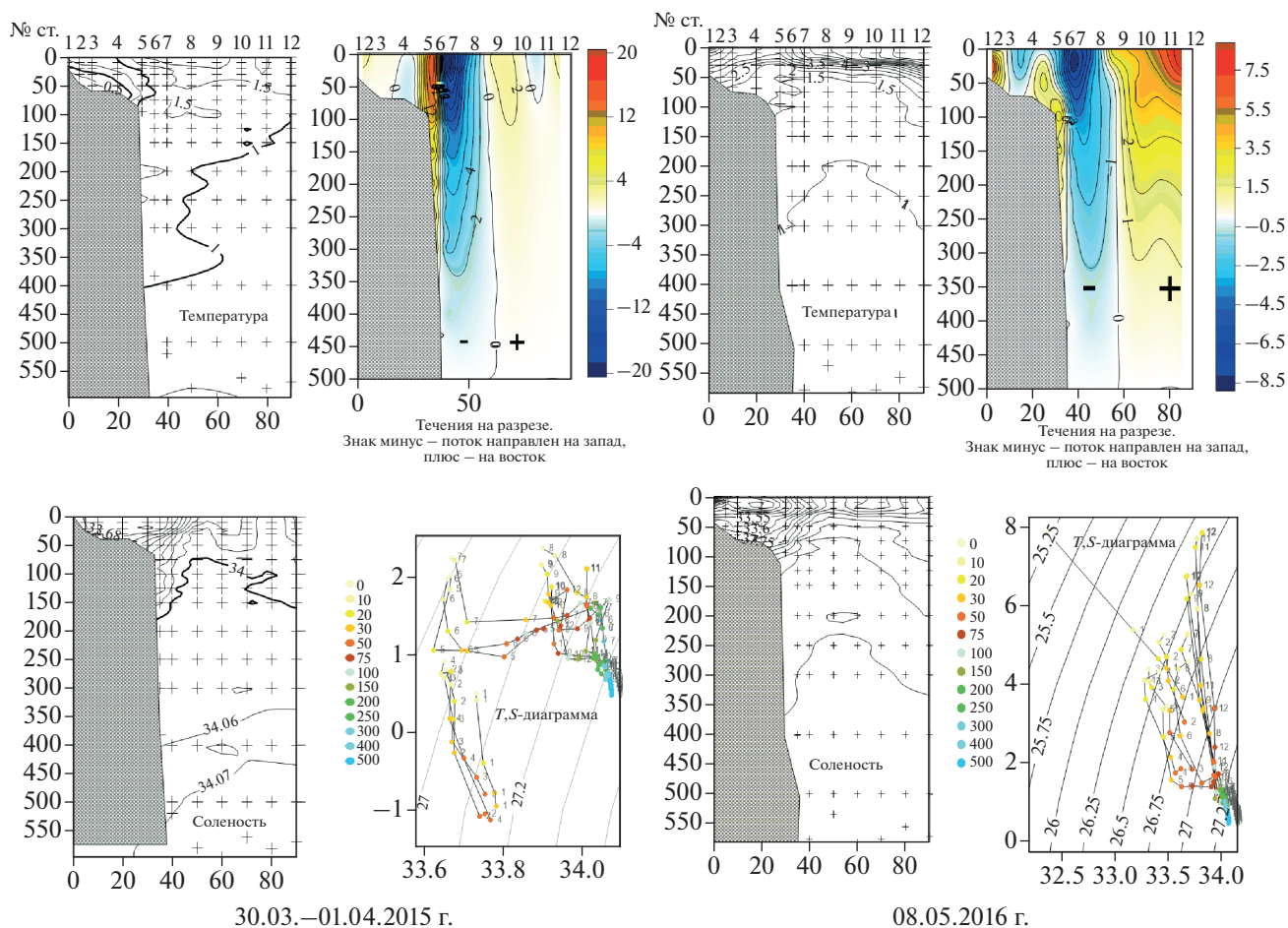


Рис. 2. Гидрологическая ситуация на разрезе по 132 меридиану 30.03–01.04.2015 г. и 08.05.2016 г.

япономорской водной массы, из которых T,S -кривые станций №№ 1–4 — наиболее холодные воды Приморского течения. Расчетные скорости течений западных составляющих составили 20 см/с вдоль свала глубин залива Петра Великого. Положение Приморского течения совпадает с результатами спутниковых наблюдений и четко прослеживается в западной части разреза в виде потока западного направления.

В мае 2016 г. Приморское течение представлено единым потоком, проходило вдоль всего материка и хорошо прослеживалось на всем протяжении Южного Приморья, вплоть до $41^{\circ}30'$ с.ш. (рис. 1г, д, е). Стрежень Приморского течения по сравнению с 2015 г. проходил мористее, оттеснен более теплыми водами, расположенные узкой полосой вдоль всего побережья. Линия стрежня Приморского течения была извилиста и проходила в 5–15 милях от берега. Фронт Приморского течения размыт сильнее, чем в 2015 г., перепад температуры на фронте значительно ниже. Наибольшие перепады температуры на фронте Приморского течения наблюдались в районах со-

прикосновения теплых вод и непосредственно Приморского течения, в данном случае в районе 44° с.ш. (от 1.5 до 4.3°C). В заливе Петра Великого Приморское течение четко проходило вдоль свала глубин, часть вод проникала в Уссурийский залив. В отличие от 2015 г. в 2016 г. спутниковое изображение показывает обширную область теплых вод (4 – 6°C), сформированную на шельфе залива.

Весь Амурский залив и часть вод у западного побережья Уссурийского залива была занята теплыми водами. К западу от о. Аскольд струи Приморского течения проникали в Уссурийский залив, следуя в направлении о. Русский и далее через проливы между островами Рейнеке, Русский и Попова, пролив Босфор-Восточный, поверхностные воды Уссурийского залива проникали в Амурский залив. Как видно на рис. 1г, д, е, Приморское течение между 43° и 45° с.ш. изменяло общее направление, отдельные узкие полосы, отклонялись как в южном, так и в восточном направлениях. Одновременно на границе Приморского течения наблюдались отдельные теплые вторже-

ния из восточной части моря. Тихоокеанские воды проникали как в южную часть залива Петра Великого, так и в районы бухты Владимира, мысов Белкина и Золотой, где формировались очаги теплых вод. На стандартном разрезе “132° в.д.” в 2016 г. Приморское течение отражалось в северной части разреза на станциях №№ 5–8 (рис. 2). Наиболее низкая соленость (менее 33.30‰) наблюдалась в верхнем 20-метровом слое. Слой повышенных градиентов температуры воды (сезонный термоклин) формировался между горизонтами 20–50 м. В южной оконечности разреза прослеживалась граница мезомасштабного антициклонического вихря, граница которого хорошо проявлялась на спутниковом снимке (рис. 1з). *T,S*-кривые океанографических станций показали три разновидности северной япономорской водной массы. Вертикальная структура вод в мелководном районе показана *T,S*-кривой станции № 1. Наибольшие расчетные скорости течений западных составляющих (более 11.0 см/с) наблюдались в области Приморского течения. Приморское течение четко проходило вдоль свала глубин залива Петра Великого.

В мае 2013 г. (“нормальный”) в СЗ части Японского моря была выполнена гидробиологическая съемка. Для уточнения деталей динамики вод Приморского течения в прибрежной части моря было подобрано несколько ИК-изображений со спутника NOAA за май 2013 г. и из них выбрано одно. Спутниковое изображение за 30 мая 2013 г. и геострофические течения на фоне динамической топографии (дин. см) относительно поверхности 500 дб на горизонтах 50 м в мае 2013 г. представлено на рис. 3, из которого видно удовлетворительное согласование спутниковых данных (рис. 3а) и расчетных карт поверхностных течений, рассчитанных по гидрологическим данным (рис. 3б). Как видно на рис. 3а, Приморское течение наблюдалось вдоль прибрежной материковой части узкой полосой шириной до 50–60 км вплоть до м. Поворотный. На траверзе м. Поворотный течение прерывалось и только с западной стороны м. Поворотный Приморское течение возобновлялось. Также на спутниковом снимке видно, что на шельфе залива Петра Великого сформирована обширная область теплых вод (6–8°C). К северу от м. Поворотный Приморское течение представлялось цепью мезомасштабных антициклонических вихрей. Все вихри формировались вдоль Приморского фронта. Приморское течение на спутниковом изображении (рис. 3а), в отличие от расчетных данных (рис. 3б), более детализировано, представлено вдоль всего материкового побережья цепью мезомасштабных антициклонических вихрей. Видно, что в области Приморского течения к северу от 43° с.ш. вторгаются отдельные теплые потоки, приводящие к деформации Приморского течения и формирова-

нию меандров и вихрей вдоль всего фронта Приморского течения. Эти вихри в основном обнаруживаются вдоль южного побережья Приморья осенью, однако в нашем случае представленные вихри наблюдались весной. Таким образом, мы видим соответствие спутниковых данных и расчетных. Представленный фрагмент ИК-изображения участка Японского моря, на котором хорошо видно Приморское течение, отражает известные из литературы основные черты динамики вод Японского моря. Мы видим, что структура Приморского течения, выявленная по материалам спутниковой информации или совместно со спутниковой, намного сложнее, чем это отмечается по гидрологическим данным.

Приморское течение в июне

Теперь рассмотрим ИК-изображения Приморского течения в июне 2004 и 2008 г. (рис. 4). По термодинамическому состоянию вод северо-западной части моря оба года относятся к “теплому” типу лет. В эти годы Приморское течение не развито, не имеет сплошного потока или проявляется узкой полосой и даже может представляться цепью мелких антициклонических вихрей, прерываться и прижиматься к побережью.

В июне 2004 г. Приморское течение не развито, не имело сплошного потока, прерывалось, прижималось к побережью. Границы этого течения размыты и представляли собой отдельные узкие полосы вдоль побережья, шириной до 20 км, или обнаруживали себя отдельными небольшими пятнами холода, прижатые к побережью (рис. 4а, б, в).

Стрежень Приморского течения прослеживается только к северу от 46° с.ш. и прижат к побережью. На рисунке видно, что Приморское течение южнее 44° с.ш. отклонялось на юг в виде узкой полосы. Иногда вдоль побережья отмечались и поперечные холодные струи, отходящие от мысов. Взаимное проникновение теплых и холодных узких полос заметно в прибрежье среднего Приморья (рис. 4а). В результате теплых вторжений с востока, на границе Приморского течения формировались меандры и отдельные мезомасштабные вихри. Среди них наиболее заметны струи, меандры и мезомасштабные антициклонические вихри с хорошо выраженной спиралевидной структурой отмечались на участке между 43° с.ш. и 45°20' с.ш. (рис. 4б). На траверзе залива Петра Великого вдоль свала глубин Приморское течение представлено узкой прерывистой полосой шириной 5–10 км. Также спутниковое изображение показывает обширную область теплых вод (12–15°C), сформированную на шельфе залива. Весь Амурский залив и часть вод у западного побережья Уссурийского залива была занята теплыми водами. На океанографическом разрезе по 132° в.д. в 2004 г. фронт Приморского течения прослеживался по

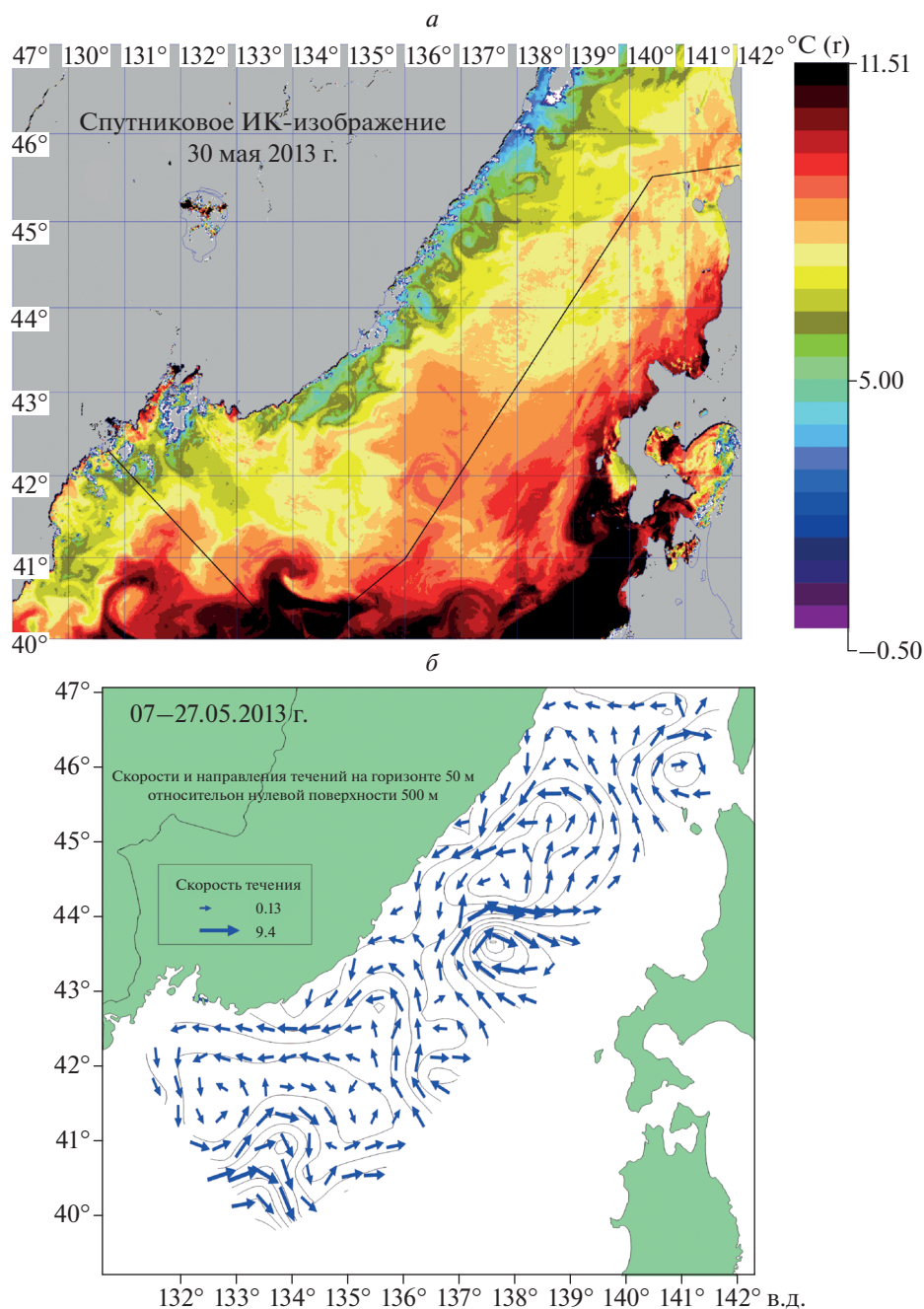


Рис 3. Фрагмент ИК-изображения северо-западной части Японского моря за 30 мая 2013 г. (а) и геострофические течения на фоне динамической топографии относительно поверхности 500 дб на горизонтах 50 м в мае 2013 г. (б). Примечание: черной линией обозначена экономическая зона России в Японском море на рис. 3а; цветная шкала справа от верхнего рисунка – температура воды в градусах °С; см. обозначения на рис. 1.

температуре между станциями №№ 7–8, а по солености – №№ 8–10 (рис. 5). В результате радиационного прогрева к югу от п-ова Муравьева-Амурского сформировались слои повышенных градиентов температуры и солености (сезонные термоклин и галоклин), которые располагались между глубинами 10–50 м. В районе станций №№ 7–8 сезонный термоклин разделялся на нижний и верх-

ний и выходил на поверхность. На статистической диаграмме T,S -кривые станций №№ 1–8 и №№ 10–11 показали две разновидности северной япономорской водной массы. T,S -кривые станций № 9 и № 12 отличались наличием верхнего прогретого и сильно распресненного слоя, а на подповерхностных горизонтах – ядром с повышенной соленостью 34.10‰ (характерным

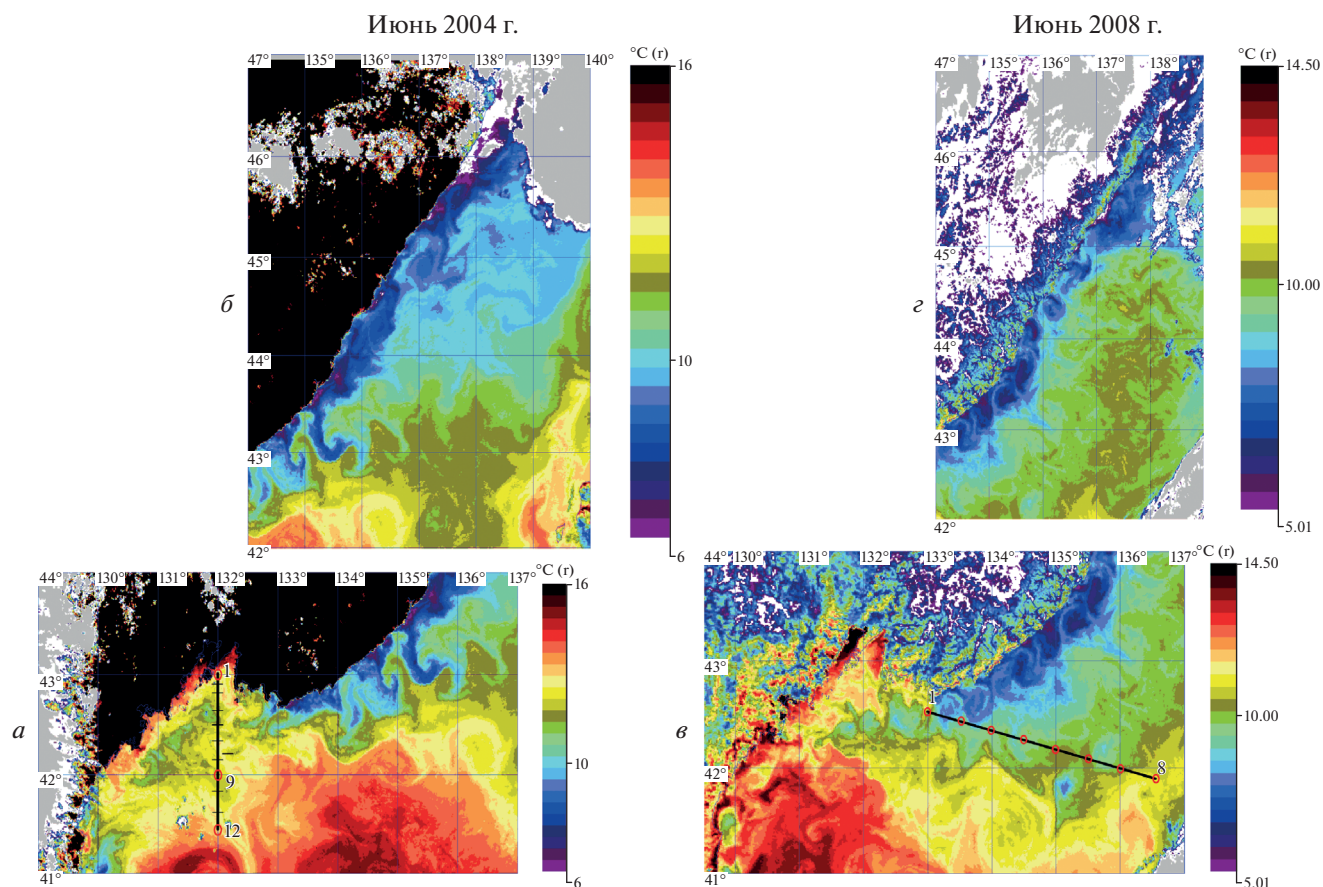


Рис. 4. Приморское течение (Японское море) на спутниковых ИК-изображениях 13 июня 2004 г. и 10 июня 2008 г. Примечание: *a* – Приморское течение в районе южного (к югу от залива Петра Великого) и среднего Приморья; *б* – Приморское течение в районе среднего и северного Приморья; *1–12* – разрез по 132 меридиану; *1–8* – разрез “Сангарский”; см. обозначения на рис. 1.

признаком тихоокеанской водной массы). Наибольшие расчетные скорости течений западных составляющих (11 см/с и более) наблюдались в районе свала глубин залива Петра Великого в области Приморского течения в верхнем 50-м слое. Приморское течение в целом прослеживалось до глубины 300–400 м.

В июне 2008 г. в отличие от 2004 г. Приморское течение представлялось цепью мезомасштабных антициклонических вихрей диаметром 25–40 км с хорошо выраженными спиралями шириной 2–5 км (рис. 4*г*, *д*, *е*). На участке между 44° и 45° с.ш. два наиболее крупных вихря находились очень близко к побережью, в результате Приморское течение на этом участке практически прерывалось. На этом участке Японского моря ширина шельфа составляет всего лишь 20–30 км и далее он переходит в крутой материковый склон практически такой же ширины, а это может сказываться на формировании множества вихрей такого масштаба. В отличие от 2004 г. в 2008 г. спутниковое изображение показывает обширную область теплых вод на шельфе залива Петра Великого. Весь

Амурский залив и Уссурийский залив были заняты теплыми водами (13–15°С и более). В южном Приморье вдоль свала глубин залива Петра Великого Приморское течение представлялось несколькими антициклоническими вихрями, диаметр которых с востока на запад уменьшался (рис. 4*в*). Мы видим, что от побережья в мористую сторону (район свала глубин ЗПВ) вытянуты теплые струи, образуя мезомасштабные антициклонические вихри и одновременно захватывая с мористой стороны теплые мористые воды (рис. 4*г*). Видимо происходит водообмен шельфовой зоны с открытой частью моря. И такую картину (рис. 4*в*, *г*) мы наблюдаем в водах Приморского течения на всем его протяжении. На гидрологическом разрезе “Сангарский” в 2008 г. воды Приморского течения соседствовали с тихоокеанской водной массой (рис. 5).

На *T,S*-диаграмме станции №№ 1–3 показали существование северной япономорской водной массы, а *T,S*-кривые станций №№ 4–8 – тихоокеанской. Отличительным признаком последней водной массы явилось присутствие в подпо-

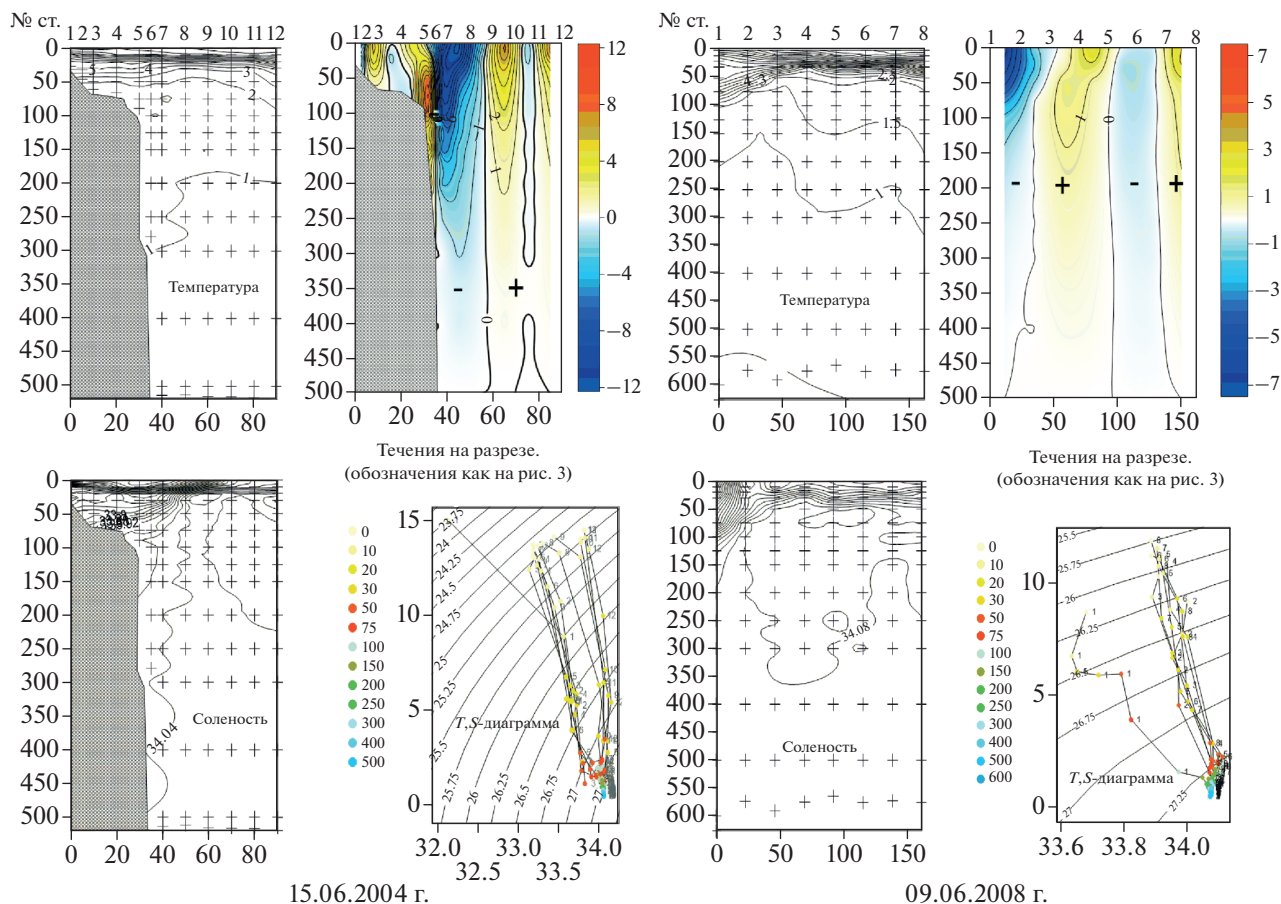


Рис. 5. Гидрологическая ситуация на разрезе по 132 меридиану 15.06.2004 г. и на разрезе “Сангарский” 09.06.2008 г.

верхностном слое 50–100 м ядер высокой солености (34.10‰). Наиболее высокие расчетные скорости течений южных составляющих наблюдались в западной части разреза в области Приморского течения. Приморское течение на разрезе прослеживалось только в западной его части.

Таким образом, в весенний период Приморское течение хорошо проявляется как на спутниковых ИК-изображениях, так и на стандартных разрезах “Сангарский” и “132° в.д.”. Особенно четко пространственная структура Приморского течения проявляется в апреле–мае.

Чаще всего в этот период времени Приморское течение имеет непрерывную (волновую) природу и проявляется в основном в виде потока или струй отходящих от побережья. В июне структура Приморского течения изменяется и распространяется в основном вихревыми образованиями. В результате воздействия динамических, адвективных и радиационных факторов на границе Приморского течения формируются меандры, отдельные мезомасштабные вихри, в водах течения часто образуются множество мезомасштабных вихрей разного знака. Среди них проявляются анти-

циклонические вихри с хорошо выраженной спиралевидной структурой, природа которых возможно связана с бароклинной неустойчивостью Приморского течения и бароклинными волнами Кельвина генерируемыми над кромкой шельфа и крутым материковым склоном при благоприятных условиях (Пономарев и др. 2011). Можно предположить, что мезомасштабные вихри являются важным элементом динамики Приморского течения, определяющих короткопериодную изменчивость физических и биологических параметров. На спутниковых ИК-изображениях видно, что на акватории залива Петра Великого Приморское течение являлось единственным устойчивым звеном горизонтальной циркуляции, основной поток которого придерживался кромки материкового шельфа на всем протяжении залива. При этом поток вод Приморского течения входит в залив с небольшой северной составляющей и примерно на меридиане 132° в.д. (о. Русский) отклоняется на юго-запад к берегам Северной Кореи. Можно предположить, что Приморское течение под влиянием рельефа дна и очертания береговой линии, в различной степени оказывает свое воздействие на циркуляцию вод в

мелководных бухтах и заливах расположенных в пределах залива Петра Великого, особенно в заливах Посъета, Находка, в проливе Аскольд, в районе архипелага островов Римского-Корсакова, где общее движение вод, как мы видим на спутниковых снимках осуществляется по системе антиклинальных круговоротов. Влияние Приморского течения на движение вод в Амурском и Уссурийском заливах значительно слабее и проявляется преимущественно в их южных районах.

Геострофические скорости и потоки воды западного направления у свала глубин залива Петра Великого на разрезах “132° в.д.” и “Сангарский” тождественны Приморскому течению. На этих разрезах Приморское течение отмечалось до глубин 300–400 м.

Анализ спутниковых ИК-изображений показал, что формирование мезомасштабных вихрей разных знаков вдоль Южного Приморья также может быть связано с сильными и продолжительными ветрами, вызывающими вдоль побережья апвеллинг и водообмен шельфовой зоны с открытым морем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование спутниковых изображений высокого разрешения поверхности Японского моря позволило кардинально дополнить структуру Приморского течения, которая ранее сложилась на основе исследования судовых наблюдений. В частности более детально прослежено движение вод Приморского течения, как на всем его протяжении, так и на отдельных его участках. Было прослежено формирование меандров, струй и мезомасштабных вихрей связанных с областью Приморского течения.

В силу изменчивости термодинамических причин и гидрометеорологических условий Приморское течение в физическом аспекте имеет двойственную природу — непрерывную (волновую) и дискретную. В первом случае течение существовало в форме потока или струй, отходящих от побережья, во втором — распространялось, главным образом, вихревыми образованиями. В связи с этим динамика вод Приморского течения представляет собой множественный характер. Пространственная структура Приморского течения отчетливо проявлялась в апреле–мае и чаще имеет непрерывную (волновую) природу и проявляется в основном в виде потока или струй отходящих от побережья. В июне структура Приморского течения изменяется и распространяется в основном вихревыми образованиями. В связи с этим, межгодовые различия в структуре вод Приморского течения проявляются в отдельные годы присутствием как множества мезомасштабных вихрей, так и одиночных.

Воды Приморского течения и его противотечения — Южно-Приморского, формируют в северо-западной части Японского моря систему вод — северную япономорскую водную массу или водную массу Приморского течения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александрин А.И., Александрина 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. 2006. Вып. 3. Т. II. Москва, ООО “Азбука-2000”. С. 9–15.
- Андреев А.Г.* Особенности циркуляции вод в южной части Татарского пролива // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 1. С. 3–11.
- Белинский Н.А., Истошин Ю.В.* Приморское течение по материалам экспедиции шхуны “Россинанте” 1936 г. // Тр. ЦИПа. Выпуск 017. М.: Гидрометеоздат, 1950. С. 132–143.
- Булатов Н.В.* Некоторые черты синоптической и межсезонной изменчивости в системе вод Курисио по данным метеорологических спутников Земли // 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.
- Вдовин А.Н., Измятинский Д.В., Соломатов С.Ф.* Основные результаты исследований рыб морского прибрежного комплекса Приморья // Изв. ТИНРО. 2004. Т. 138. С. 168–190.
- 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. 66–83.
- Данченков М.А.* Непериодические течения. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том VIII. Японское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 2003. С. 313–326.
- Дерюгин К.М.* Японские гидрологические исследования в Японском и Охотском морях // Записки по гидрографии. 1930. Т. 59. С. 35–55.
- Дьяков Б.С.* Пространственно-временные изменения гидрологических условий в Японском море. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. Владивосток. 2008. 24 с.
- Истошин Ю.В.* О возможности предсказания температуры воды на подходах к заливу Петра Великого // Тр. ЦИПа. 1950. Вып. 017. С. 154–158.
- Истошин Ю.В.* Течения Японского моря по данным бутылочной почты // Тр. ЦИПа. 1950. Вып. 017. С. 88–105.
- Истошин Ю.В.* Морские течения. Владивосток: Дальневосточное книжное издательство. 1975. 88 с.
- Ладыченко С.Ю., Лобанов В.Б.* Синоптические вихри в районе залива Петра Великого по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 4. С. 4–15.

- Леонов А.К. Региональная океанография. Л.: Гидрометеиздат. 1960. Ч. 1. 766 с.
- 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. Новая схема поверхностной циркуляции Японского моря с учетом синоптических вихрей // Изв. ТИНРО. 2009. Т. 157. С. 158–167.
- 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., Лобанов В.Б., Данченков М.А. Возможные пути переноса субтропических вод в район Дальневосточного морского заповедника // Изв. ТИНРО. 2002а. Т. 131. С. 41–53.
- Никитин А.А., Юрасов Г.И. Синоптические вихри Японского моря по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 5. С. 42–57.
- Никитин А.А., Дьяков Б.С. Структура фронтов и вихрей в западной части Японского моря // Известия Тихоокеанского научно-исследовательского рыбохозяйственного центра. Биология промысловых объектов ДВ российских вод и их экосистемные связи / Под ред. В.П. Шунтова. Владивосток. 1998. Т. 124. Ч. 2. С. 714–733.
- Никитин А.А., Дьяков Б.С., Капшитер А.В., Нурждин В.А. Исследование океанологических условий в северо-западной части Японского моря в весенние сезоны 2000–2017 гг. Труды ВНИРО. 2018. Т. 173. С. 119–136.
- Пономарев В.И., Файман П.А., Дубина В.А., Машкина И.В. Синоптические вихри над материковым склоном Японской котловины и шельфом Приморья // Изв. ТИНРО. 2011. Т. 167. С. 160–175.
- Рогачев К.А. Динамика антициклонических вихрей и быстрое обновление вод Уссурийского залива (Японское море) по спутниковым и морским наблюдениям // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 6. С. 19–28
- Сизова Ю.В. Циркуляция вод Японского моря. В кн.: Основные черты геологии и гидрологии Японского моря. М.: АН СССР. 1961. С. 146–154.
- Трусенкова О.О. Сезонные и межгодовые изменения циркуляции вод Японского моря. Дальневосточные моря России. Кн. 1: Океанологические исследования М.: Наука, 2007. С. 280–306.
- Юрасов Г.И., Яричин В.Г. Течения Японского моря. Владивосток: ДВО АН СССР. 1991. 174 с.
- Яричин В.Г. Состояние изученности циркуляции вод Японского моря // Тр. ДВНИГМИ. 1980. Вып. 80. С. 46–61.
- Яричин В.Г. Некоторые особенности горизонтального движения вод в Японском море к северу от 40° с.ш. // Тр. ДВНИГМИ. 1982. Вып. 96. С. 111–120.
- Яричин В.Г., Покудов В.В. Формирование структурных особенностей гидрофизических полей и течений в северной глубоководной части Японского моря // Тр. ДВНИГМИ. 1982. Вып. 96. С. 86–95.
- Isoda Y., Saitoh S. The northward intruding eddy along the east coast of Korea // J. Oceanogr. 1993. V. 49. P. 443–458.
- Isoda Y. Warm eddy movements in the eastern Japan Sea // J. Oceanography. 1994. V. 50. № 1. P. 1–16.
- Ichiye T., Takano K. Mesoscale eddies in the Japan Sea // La Mer. 1988. V. 26. № 2. P. 69–75.
- Ostrovskii A., Hiroe Y. The Japan Sea circulation as seen in satellite infrared imagery in Autumn 1993 // Proc. CREAMS'94. Fukuoka. 1994. P. 75–88.

The Primorskoe Current on Standard Sections and Satellite Images of the Japan Sea Surface

A. A. Nikitin¹, B. S. Djakov^{1, †}, and A. V. Kapshiter¹

¹Pacific Research Fisheries Centre (FSBSI “TINRO-Centre”), Vladivostok, Russia

In the Japan Sea, a three-dimensional analysis of the Primorskoe Current was carried out on the basis of joint use of satellite and ship information in April–June 2000–2017. Satellite data are represented by the sea surface images in the infrared and optical ranges and ship information is represented by the deep-sea temperature and salinity measurements on surveys and standard oceanographic sections. Maps of the sea level anomalies are constructed according to altimetric data for the purpose of geostrophic circulation identification in the spring seasons of the years under study. As a result of this work, modern ideas about the picture of the Primorskoe Current are supplemented. It is shown that the dynamics of the Primorskoe Current waters has a multiple character. Oscillations of the Primorskoe Current thermodynamic structure can indirectly affect the degree of behavior and distribution of biological objects. So, range of the Primorye greenling population and the south Primoryepollock population are formed under influence of the Primorskoe Current, the configuration and power of which is subject to seasonal and interannual variability. In addition, one of the subpopulations of Primorye greenling population is permanently located in the zone of influence of the Primorskoe Current (Vdovin, Izmyatinsky, Solomatov, 2004).

Keywords: Japan Sea, Primorskoe Current, satellite images, ship information, oceanological structures, water dynamics, standard section, survey, temperature, salinity

REFERENCES

- Aleksanin A.I., Aleksanina M.G.* Monitoring termicheskikh struktur poverxnosti okeana podannym IK-kanala sputnikov NOAA na primere Prikuril'skogo rajona Tixogo okeana [Monitoring of thermal structures of the ocean surface according to the IR channel of NOAA satellites on the example of the Urals region of the Pacific ocean] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. Fizicheskie osnovy, metody i tekhnologii monitoring okruzhayushhej sredy, potencial'noopasnykh yavlenij ob'ektov.* 2006. Vyp. 3. Tom. II. Moskva, OOO "Azbuka-2000". P. 9–15 (In Russian).
- Andreev A.G.* Osobennosti cirkulyacii vod v yuzhnoj chasti Tatarskogo proliva // *Issled. Zemli iz kosmosa.* 2018. № 1. P. 3–11 (In Russian).
- Belinskij N.A., Istoshin Yu. V.* Primorskoe techenie po materialam e'kspedicii shxuny "Rossinante" 1936 g [Seaside current based on the expedition of the schooner "Rossinante" 1936] // *Tr. CIPa. Vypusk 017. M.: Gidrometeoizdat.* 1950. P. 132–143 (In Russian).
- Bulatov N.V.* Nekotorye cherty sinopticheskoy i mezhsazonnoj izmenchivosti v sisteme vod Kuroshio po dannym meteorologicheskikh sputnikov Zemli [Some features of SYNOPSIS and interseasonal variability in the Kuroshio water system according to meteorological satellites] // *Tr. DVNIGMI.* 1980. V. 80. P. 34–45 (In Russian).
- Bulatov N.V.* Rekomendacii po ispol'zovaniyu sputnikovyx IK snimkov v okeanologicheskikh issledovaniyax [Recommendations on the use of satellite infrared imagery in the Oceanographic studies] Vladivostok. TINRO. 1984. 43 p. (In Russian).
- Vdovin A.N., Izmyatinskij D.V., Solomatov S.F.* Osnovnye rezul'taty issledovaniy ryborskogo pribrezhnogo kompleksa Primor'ya [The main results of research of fish of the sea coastal complex of Primorye] // *Izv. TINRO.* 2004. V. 138. P. 168–190 (In Russian).
- Ginzburg A.I., Kostyanov A.G., Ostrovskij A.G.* Poverxnostnaya cirkulyaciya Yaponskogo morya (sputnikovaya informaciya i dannye dreyfuyushhix buyov) [Surface circulation of the sea of Japan (satellite information and drifting buoy data)] // *Issled. Zemli iz kosmosa.* 1998. № 1. P. 66–83.
- Danchenkov M.A.* Neperiodicheskie techeniya. Gidrometeorologiya i gidroximiya morej. [Non-periodic currents. Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas] Tom VIII. Yaponskoe more. Vypusk 1. Gidrometeorologicheskie usloviya. Sankt-Peterburg: Gidrometeoizdat. 2003. P. 313–326 (In Russian).
- Deryugin K.M.* Yaponskie gidrologicheskie issledovaniya v Yaponskom i Oxotskom moryax [Japanese hydrological research in the sea of Japan and the sea of Okhotsk] // *Zapiski po gidrografii.* 1930. V. 59. P. 35–55 (In Russian).
- D'yakov B.S.* Prostranstvenno-vremennyye izmeneniya gidrologicheskikh uslovij v Yaponskom more [Spatial-temporal changes in hydrological conditions in the sea of Japan] Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata geograficheskikh nauk. Vladivostok. 2008. 24 p. (In Russian).
- Istoshin Yu.V.* O vozmozhnosti predskazaniya temperatury vody na podkhodax k zalivu Petra Velikogo [On the possibility of predicting water temperature on the approaches to Peter the Great Bay] // *Tr. CIPa.* 1950. Vyp. 017. P. 154–158 (In Russian).
- Istoshin Yu.V.* Techeniya Yaponskogo moray po dannym buty lochnoj pochty [Currents of the sea of Japan according to bottle mail] // *Tr. CIPa.* 1950. Vyp. 017. P. 88–105 (In Russian).
- Istoshin Yu.V.* Morskie techeniya [Sea current] Vladivostok: Dal'nevostochnoe knizhnoe izdatel'stvo. 1975. 88 s. (In Russian).
- Ladychenko S.Yu., Lobanov V.B.* Sinopticheskie vixri v rajone zaliva Petra Velikogo po sputnikovym dannym [Synoptic eddies in the area of Peter the Great Bay according to satellite data] // *Issled. Zemli iz kosmosa.* 2013. № 4. P. 4–15 (In Russian).
- Leonov A.K.* Regional'naya okeanografiya [Regional Oceanography] L.: Gidrometeoizdat, 1960. Ch. 1. 766 p. (In Russian).
- Nikitin A.A.* Osnovnye cherty prostranstvennogo raspredeleniya poverxnostnykh termicheskikh frontov v vodax Yaponskogo morya i ix izmenchivost' // *Issled. Zemli iz kosmosa.* 2006. № 5. P. 49–62 (In Russian).
- Nikitin A.A., D'yakov B.S.* Evolyuciya anticiklonicheskogo vixrya v Yaponskom more u beregov Korei v sisteme vod Vostochno-Korejskogo techeniya v 1991–1992 gg. (po dannym sputnikovoj i sudovoj informacii) // *Issled. Zemli iz kosmosa.* 1995. № 6. P. 90–98 (In Russian).
- Nikitin A.A., Lobanov V.B., Danchenkov M.A.* Vozmozhnye puti perenosa subtropicheskikh vod v rajon Dal'nevostochnogo morskogo zapovednika [Possible ways to transfer subtropical waters to the far Eastern marine reserve] // *Izv. TINRO.* 2002a. V. 131. P. 41–53 (In Russian).
- Nikitin A.A., Danchenkov M.A., Lobanov V.B., Yurasov G.I.* Novaya sxema poverxnostnoj cirkulyacii Yaponskogo morya s uchytom sinopticheskikh vixrej [New scheme of surface circulation of the sea of Japan taking into account synoptic eddies] // *Izv. TINRO.* 2009. V. 157. P. 158–167 (In Russian).
- Nikitin A.A., Yurasov G.I.* Sinopticheskie vixri Yaponskogo moray po sputnikovym dannym [Synoptic eddies of the sea of Japan according to satellite data] // *Issled. Zemli iz kosmosa.* 2008. № 5. P. 42–57 (In Russian).
- Nikitin A.A., D'yakov B.S.* Struktura frontov i vixrej v zapadnoj chasti Yaponskogo moray [Structure of fronts and eddies in the Western part of the sea of Japan] // *Izvestiya Tixookeanskogo nauchno-issledovatel'skogo ryboxozyajstvennogo centra. Biologiya promyslovykh ob'ektov DV rossijskix vod i ix ekosistemnye svyazi / Pod red. V.P. Shuntova.* Vladivostok. 1998. V. 124. Ch. 2. P. 714–733 (In Russian).
- Nikitin A.A., D'yakov B.S., Kapshiter A.V., Nuzhdin V.A.* Issledovanie okeanologicheskikh uslovij v severo-zapadnoj chasti Yaponskogo morya v vesennie sezony 2000–2017 gg. [Study of Oceanological conditions in the North-Western part of the sea of Japan in the spring seasons 2000–2017] // *Trudy VNIRO.* 2018. V. 173. P. 119–136 (In Russian).
- Ponomaryov V.I., Fajman P.A., Dubina V.A., Mashkina I.V.* Sinopticheskie vixri nad materikovym sklonom Yaponskoj kotloviny i shel'fom Primor'ya [Synoptic eddies over the continental slope of the Japan basin and Primorye shelf] // *Izv. TINRO.* 2011. V. 167. P. 160–175 (In Russian).
- Rogachev K.A.* Dinamika anticiklonicheskikh vixrej i bystrogo obnovlenie vod Ussurijskogo zaliva (Yaponskoe more) po sputnikovym i morskim nablyudeniyam // *Issled. Zemli iz kosmosa.* 2012. № 6. P. 19–28 (In Russian).

- Sizova Yu.V.* Cirkulyaciya vod Yaponskogo morya [Circulation of the waters of the sea of Japan] V kn.: Osnovnye cherty geologii i gidrologii Yaponskogo morya. M.: AN SSSR. 1961. P. 146–154 (In Russian).
- Trusenkova O.O.* Sezonnnye imezhgodovye izmeneniya cirkulyacii vod Yaponskogo morya. Dal'nevostochnye morya Rossii [Seasonal and interannual changes in the circulation of the waters of the sea of Japan. Far Eastern seas of Russia] Kn. 1: Okeanologicheskie issledovaniya. M.: Nauka. 2007. P. 280–306 (In Russian).
- Yurasov G.I., Yarichin V.G.* Teleniya Yaponskogo morya [Currents of the sea of Japan] Vladivostok: DVO AN SSSR. 1991. 174 p. (In Russian).
- Yarichin V.G.* Sostoyanie izuchennosti cirkulyacii vod Yaponskogo morya [The state of knowledge of water circulation in the Japan sea] // Tr. DVNIGMI. 1980. 1980. Vy'p. 80. P. 46–61 (In Russian).
- Yarichin V.G.* Nekotorye osobennosti gorizontal'nogo dvizheniya vod v Yaponskom more k severu ot 40° s.sh. [Some features of the horizontal movement of waters in the sea of Japan North of 40°C] // Tr. DVNIGMI. 1982. Vyp. 96. P. 111–120 (In Russian).
- Yarichin V.G., Pokudov V.V.* Formirovanie strukturnykh osobennostej gidrofizicheskix polej i techenij v severnoj glubokovodnoj chasti Yaponskogo morya [Formation of structural features of hydrophysical fields and currents in the Northern deep sea of Japan] // Tr. DVNIGMI. 1982. Vyp. 96. P. 86–95 (In Russian).
- Isoda Y., Saitoh S.* The northward intruding eddy along the east coast of Korea // J. Oceanogr. 1993. V. 49. P. 443–458.
- Isoda Y.* Warm eddy movements in the eastern Japan Sea // J. Oceanography. 1994. V. 50. № 1. P. 1–16.
- Ichiye T., Takano K.* Mesoscale eddies in the Japan Sea // La Mer. 1988. V. 26. № 2. P. 69–75.
- Ostrovskii A., Hiroe Y.* The Japan Sea circulation as seen in satellite infrared imagery in Autumn 1993 // Proc. CREAMS'94. Fukuoka. 1994. P. 75–88.