

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ ВОД В СЕВЕРНОЙ ПОЛОВИНЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ В ОСЕННЕ-ЗИМНИЙ ПЕРИОД ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ И СУДОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2024 г. А. Ф. Сергеев¹ *, В. Б. Лобанов¹, В. А. Горячев¹, Н. В. Шлык¹, Е. Н. Марьина¹,
Н. Б. Лукьянова¹, И. И. Горин¹, В. Цой¹, С. А. Зверев¹, А. Ю. Юрцев²,
И. А. Прушковская¹, С. Ю. Ладыченко¹

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

²Национальный оператор научно-исследовательского флота, Владивосток, Россия

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

Поступила в редакцию 31.10.2023 г.

Приводятся результаты исследований структуры и динамики вод в зоне крупномасштабного циклонического круговорота (КЦК) в северной половине Японского моря, где на спутниковых ИК-изображениях ежегодно в осенне-зимний период наиболее отчетливо проявляются две области пониженных температур, разделенных затоком теплых цусимских вод со стороны Японии. Расположение данных термических структур совпадает с расположением малого западного и северного циклонических круговоротов, неразрывно связанных с глубинным апвеллингом. В осенне-зимние периоды 2019–2021 гг. установлено, что глубинный апвеллинг в северо-западной части Японского моря распространяется от дна до поверхностного слоя, фокусируясь вдоль осевой линии, проходящей через возвышенность Первенец и хребты Берсенева и Васильковского в районе 42° с.ш. между 132° в.д. и 135.5° в.д. Циклонический круговорот (ЗЦК), расположенный в западной части КЦК в области рассматриваемого глубинного апвеллинга, является крупным топографическим вихрем. В северной части КЦК глубинный апвеллинг приурочен к континентальному клону, там же располагается и северный циклонический круговорот (СЦК). Предполагается, что в осенне-зимний период взаимодействие антициклонов, формирующих вихревые пояса, с циклоническими круговоротами, приводит к усилению глубинной циркуляции. Особенность изменчивости скорости глубинных течений — увеличение от октября к марту, вероятно, обусловлено характером развития вертикальной и поперечной горизонтальной циркуляции в системе циклонических круговоротов — вихревые пояса в результате интенсификации глубинного апвеллинга при усилении ветров северных румбов в зимний период.

Ключевые слова: инфракрасные спутниковые изображения, аномальные термические области, апвеллинг, циклонические круговороты, топографический вихрь, антициклонические вихри, вертикальная и поперечная горизонтальная циркуляция

DOI: 10.31857/S0205961424030053, **EDN:** FAQSAO

ВВЕДЕНИЕ

Использование спутниковых снимков в ИК-диапазоне при исследовании северной половины Японского моря позволило существенно развить представления о структуре и динамике фронтов, течений, синоптических вихрей и прибрежного апвеллинга (Жабин и др., 1993; Юрасов, 1995; Лобанов и др., 2007; Никитин и др., 2009; Никитин А.А., Юрасов Г.И., 2017). Это стало возможным благодаря особенности спутникового метода — одновременно и многократно в течение суток для всей акватории моря получать снимки с детальным распределением температуры поверхности моря (ТПМ), наблюдать возникновение и эволюцию разномасштабных

термических структур. Две такие структуры, наиболее отчетливо проявляющиеся на спутниковых снимках ежегодно в осенне-зимний период, наблюдаются в крупномасштабном циклоническом круговороте (КЦК). На спутниковых ИК-изображениях, полученных на сайте <http://www.satellite.dvo.ru> и приведенных на рис. 2, видно, что и в осенне-зимние месяцы 2019 и 2021 гг. (данные экспедиций этих лет используются в настоящем исследовании) в северной половине моря сформированы две крупномасштабные области пониженной температуры, разделенных затоком теплых цусимских вод со стороны о. Хоккайдо. Юго-западная область примерно расположена по долготе между

130°–135° в.д., по широте — от побережья до субарктического фронта на 40° с.ш., северо-восточная — между 135°–139° в.д. и 43°–46° с.ш. Со сменой летнего муссона на зимний и возникновении осеннего ветрового прибрежного апвеллинга (Гончаренко и др., 1993; Жабин и др., 1993; Юрасов, 1995) создаются условия для быстрого понижения ТПМ на обширной акватории за счет перемешивания в верхнем слое моря с усилением сгонных ветров, сезонным снижением температуры воздуха и выноса холодных трансформированных апвеллинговых вод от побережья. Одним из факторов, приводящих к формированию двух термических областей, кроме выше перечисленных, может быть недостаточно на данный момент изученное явление — подъем глубинных вод (глубинный апвеллинг открытого моря), наблюдаемый в течение года в северной половине Японского моря в области КЦК, который идентифицируется на разрезах по куполообразной конфигурации изолиний гидрологических и гидрохимических параметров (Леонов, 1960; Мокиевская, 1961; Панфилова, 1961; Покудов и др., 1976; Юрасов, Яричин, 1991; Talley et al., 2004). Причиной глубинного апвеллинга, кроме циклонической циркуляции (Баталин, 1958; Истошин, 1960; Степанов, 1961; Васильев, Макашин, 1991; Ванин, 2004), могут быть такие процессы, как компенсационный подъем вод вследствие зимней присклоновой конвекции (Леонов, 1948; Степанов, 1961; Яричин, Покудов, 1982), опускание в южных и юго-восточных районах моря из-за уплотнения при смешении япономорских холодных и теплых субтропических вод во фронтальных разделах и развитие антициклонических вихревых образований (Яричин, Покудов, 1982; Юрасов, Яричин, 1991). В 1999–2002 гг. с помощью бுவ, дрейфующих на глубине 800 м, было установлено, что характер глубинной крупномасштабной циркуляции в области Японской котловины в целом тот же, что и в поверхностном слое, причем глубинные воды охвачены циклоническим движением в течение всего года. Кроме того, было выявлено, что в пределах КЦК, в его западной и восточной частях расположены две области циклонической активности меньшего масштаба — западный и восточный циклонические круговороты (ЗЦК и ВЦК) (Данченков и др., 2005), с которыми неразрывно связаны подъемы глубинных вод. Дрейф бுவ в западной части КЦК показал, что центр ЗЦК был расположен в точке с координатами 41°30' с.ш. и 134°00' в.д. Диаметр же зоны циклонического дрейфа бувов обычно составлял около 30 миль, но “иногда циклоническое перемещение буя происходило на обширной территории...” (Данченков и др., 2005). Многочисленные расчеты течений (Леонов, 1960; Покудов, Тунеголовец, 1975; Юрасов, Яричин, 1991; Yoon et al., 2005; Трусенкова, 2007; Юрасов и др., 2011; Никитин и др., 2012) показали,

что ЗЦК может располагаться в различных местах в полосе 40°00'–42°30' с.ш. и 130°00'–136°00' в.д., что, вероятно, связано не только с особенностями расчетов, но и с изменчивостью циркуляции. Тем не менее из-за недостатка исследований пока можно судить о приблизительном расположении ЗЦК, с центральной частью которого связано максимальное влияние поднимающихся глубинных вод на верхний слой моря. Еще одна циклоническая область в КЦК — северный циклонический круговорот (СЦК) по результатам динамических расчетов отчетливо проявляется у побережья Приморья между 43°–46° с.ш. и 135°–139° в.д. на фоне развития прибрежного апвеллинга и залива цусимских вод со стороны о. Хоккайдо (Никитин и др., 2020; Никитин, и др., 2012). На схемах поверхностной геострофической циркуляции, построенных на основе данных за период с 1925 по 2005 г. (Никитин и др., 2012) все три циклонических круговорота — ЗЦК, ВЦК и СЦК, отличаясь размерами и расположением центров от сезона к сезону, круглогодично присутствуют в области КЦК.

В 1990-е годы в области КЦК с помощью стационарных автономных буйковых станций и дрейфующих глубинных бувов также обнаружено зимнее усиление динамики глубинных вод с возрастанием скорости глубинного течения от минимальных значений в октябре до максимальных в марте. Интенсификацией был охвачен весь глубинный слой от 500 до 3000 м, в котором выполнялись измерения (Takematsu et al., 1999a, 1999b; Senju et al., 2005; Choi, Yoon, 2010). Данная особенность значительно слабее проявляется в циклонических круговоротах южной половины моря (Choi, Yoon, 2010). Причиной зимней интенсификации глубинного течения может быть ветровое напряжение и термохалинное воздействие. Однако, как утверждают авторы (Yoon et al., 2005; Choi, Yoon, 2010; Трусенкова, 2018), эти факторы не в состоянии напрямую вызвать увеличение скорости глубинного течения. Тем не менее ветровое и термическое воздействие, вероятно, может опосредованно влиять на глубинную циркуляцию (Трусенкова, 2018). Другая, наиболее устоявшаяся гипотеза об усилении глубинной циркуляции в зимний период в районе Японской котловины связана с воздействием синоптических вихрей на всю толщу моря. Эта гипотеза явилась следствием экспериментальных наблюдений и модельных расчетов (Takematsu et al., 1999a, 1999b; Hogan, Hurlburt, 2000; Yoon et al., 2005; Choi, Yoon, 2010; Трусенкова, 2018). Однако механизм увеличения скорости глубинных вод с октября по март и далее ее уменьшения до октября пока не установлен (Choi, Yoon, 2010).

Еще одним явлением, с которым может быть связана интенсификация глубиной циркуляции в се-

верной половине моря зимой, является, по мнению авторов (Takematsu et al., 1999a; Трусенкова, 2007), развивающаяся в течение зимы склоновая конвекция и конвекция открытого моря (Talley et al, 2003; Лобанов и др., 2019). В рамках же такого круглогодичного явления, как глубинный апвеллинг, интенсификация глубинной циркуляции в северной половине моря зимой не рассматривалась. Таким образом, в настоящей работе по результатам анализа инфракрасных (ИК) спутниковых снимков и материалов судовых гидрологических съемок, проведенных авторами статьи в разные годы, рассматриваются обнаруживаемые спутниковым методом термические структуры поверхности северной части Японского моря, глубинный апвеллинг в области КЦК, его связь с вихрями синоптического масштаба и интенсификацией глубинной циркуляции в северной половине моря.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Спутниковые данные. В работе для анализа термического и вихревого полей северной части Японского моря используются карты ТПМ с ИСЗ НОАА, полученные в Центре коллективного пользования Регионального спутникового мониторинга окружающей среды Института автоматики и процессов управления ДВО РАН (ИАПУ ДВО РАН, Владивосток) и размещенные на сайте (<http://www.satellite.dvo.ru>). Основные положения методики обработки и анализа спутниковых снимков изложены в работах (Рекомендации по использованию..., 1984; Методические указания..., 1987; Алексанин, Алексанина, 2006) и основаны на визуальном дешифрировании ИК-изображений совместно с анализом судовых данных. Основное внимание уделялось изучению таких элементов спутниковых карт ТПМ как генезис термических мезо- и макроструктур, их положение, размеры, форма, уровни температуры и ее изменчивость. Идентификация вихрей на спутниковых снимках основывалась, прежде всего, на таких их основных признаках, как округлость или дугообразность формы с различной степенью проявления кольцеобразности или спиралевидности их структуры (Рекомендации по использованию..., 1984; Никитин, Юрасов, 2008).

Гидрологические судовые данные и измерения на донной станции. На рис. 1 представлены схемы гидрологических съемок, проведенных нами 2–21 октября 2019 г. на НИС “Академик Опарин” (рейс № 57) и 7–28 декабря 2021 г. на НИС “Академик М.А. Лаврентьев” (рейс № 97). Большинство разрезов выполнялось до границы экономической зоны РФ. STD-зондирования на всех разрезах выполнялись профилографом SBE 9plus до глубины 1000–1500 м. На разрезе по 134° в.д. в декабре

2021 г. измерения проводились до дна с максимальной глубиной зондирования 3550 м. В статье также используются данные измерений на мониторинговом разрезе по 134° в.д., выполненном нами также до дна в декабре 2020 г. в экспедиции НИС “Академик Опарин” (рейс № 62). Расположение станций STD-зондирования на мониторинговом разрезе по 134° в.д. в 2020 г. практически совпадает с расположением станций на этом разрезе при съемке в 2021 г., показанной на рис. 1б. Данные еще одного глубоководного разреза, расположенного в СЦК с крайними координатами 44°57' с.ш., 137°00' в.д. и 44°05' с.ш., 138°20' в.д. и выполненного в 58 рейсе НИС “Академик Опарин” 12–13 ноября 2019 г., также используются в работе (рис. 8). Расположение разреза показано на рис. 2 на снимке от 12 ноября 2019 г. отрезком черного цвета. Визуализация распределений гидрологических параметров в работе выполнялась при помощи программы Ocean Data View (Schlitzer, 2019). В работе также используются данные температуры и солёности, полученные с помощью измерителя SBE-37, установленного в придонном слое у берегов южного Приморья на мониторинговой донной станции на глубине 22 м (отмечено треугольником на рис. 1а).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Возникновение аномальных термических областей. Спутниковые ИК-снимки, приведенные на рис. 2, показывают, что к октябрю 2019 г., когда производилась судовая съемка (2–21 октября), в северной части моря уже сформировались две разделяемые затоком цусимских вод от о. Хоккайдо области пониженных температур. Впервые аномальные области с температурой 15°C и ниже отчетливо проявились в поле ТПМ 18 сентября. На снимках ТПМ от 9, 15 и 23 октября аномальные области имеют примерно одинаковую форму и температуру, снизившуюся до 10–14°C. На снимках от 12 и 28 ноября в поле ТПМ сохраняются также по две области с той же примерно формой и площадью, что и в октябре, но с температурами уже ниже 10°C и 5°C соответственно. Появление аномальных термических областей совпало с развитием прибрежного ветрового апвеллинга, начавшегося по данным изменчивости температуры и солёности на нашей мониторинговой донной станции, расположенной на глубине 22 м у берегов южного Приморья 12 сентября (рис. 3). Устойчивое снижение температуры у дна проходило до 7 октября (рис. 3). В результате температура снизилась от 18.7°C до 1.8°C, а солёность возросла от 32.38 е.п.с. до 34.02 е.п.с. (ранее в 2003–2007 гг. (Сергеев и др., 2008) установлена примерная одновременность начала снижения придонной температуры при апвеллинге у берегов южного и восточного Приморья,

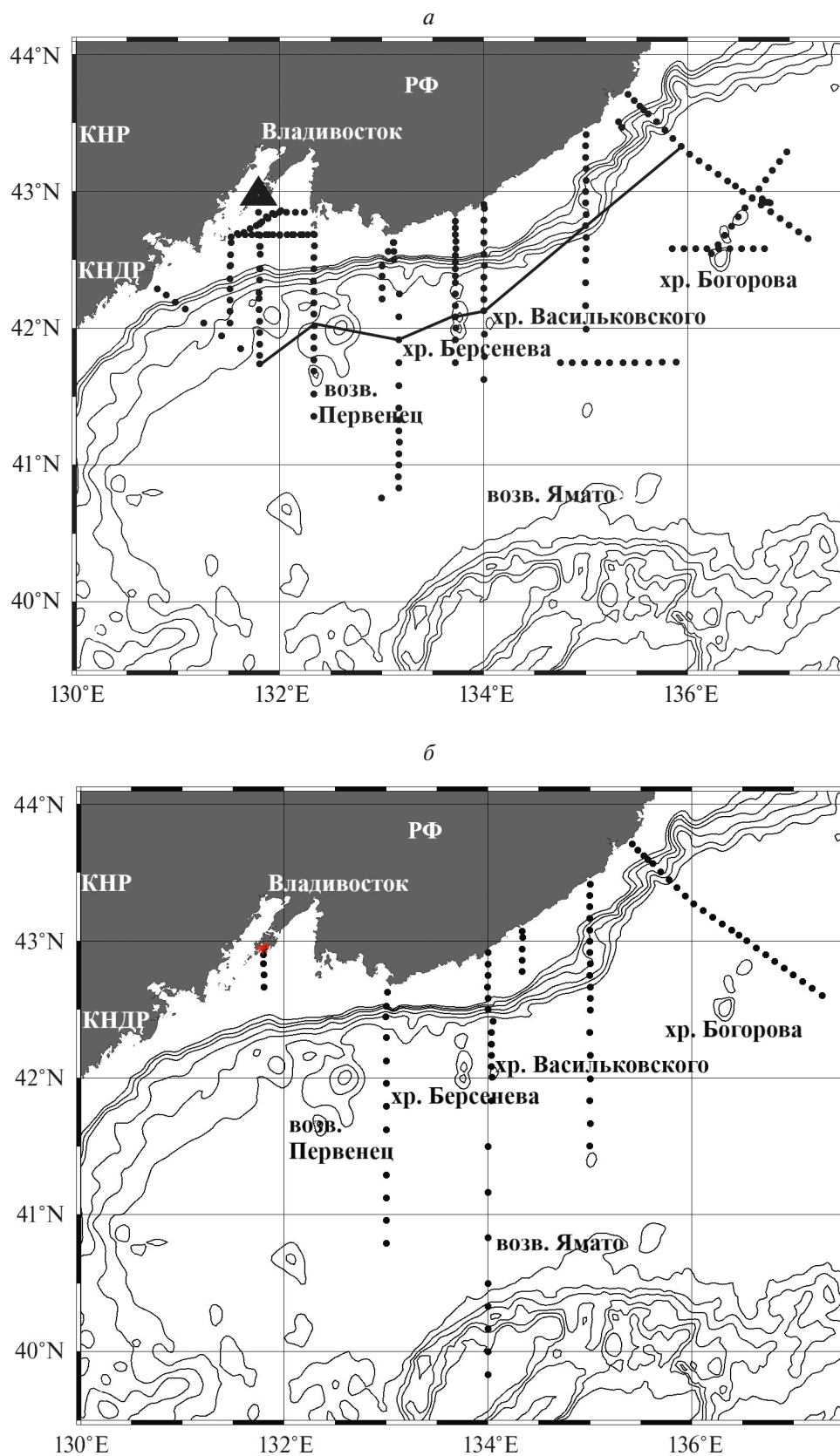


Рис. 1. Расположение СТД-станций (•): *a* – рейс № 57 НИС “Академик Опарин” 2–21 октября 2019 г.; *b* – рейс № 97 НИС “Академик М.А. Лаврентьев” 7–28 декабря 2021 г. Треугольником обозначено место расположения донной мониторинговой станции. Ломанной линией показано расположение северо-восточного разреза.

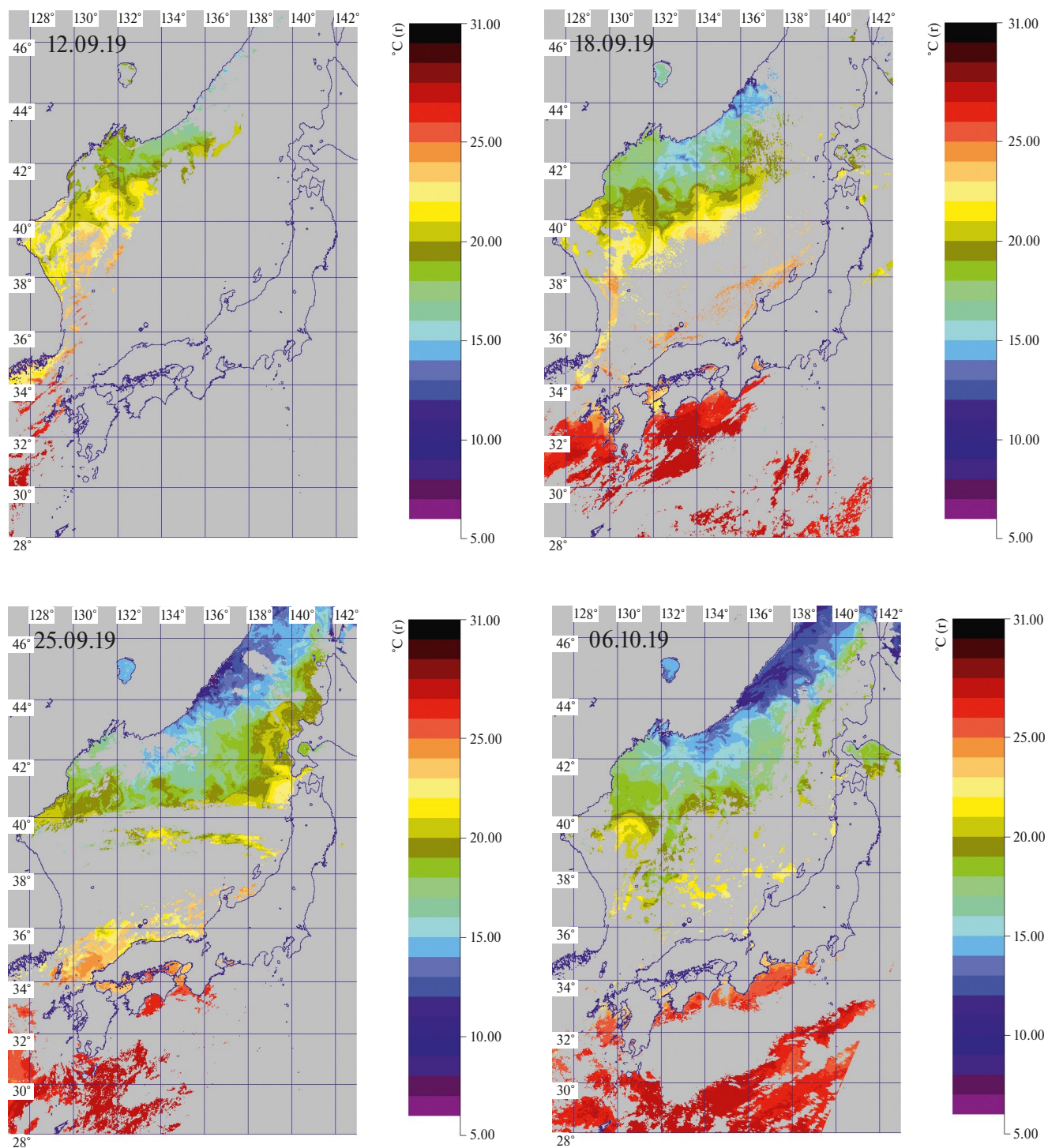


Рис. 2. Термическая структура поверхности Японского моря по данным спутниковых ИК-изображений в сентябре–ноябре 2019 г. и декабре 2021 г. В сентябре и октябре шкалы температур от 5°C до 31°C, в ноябре и декабре — от 0°C до 26°C. На снимке от 12 ноября 2019 г. черным отрезком обозначен разрез, результаты которого приведены на рис. 8.

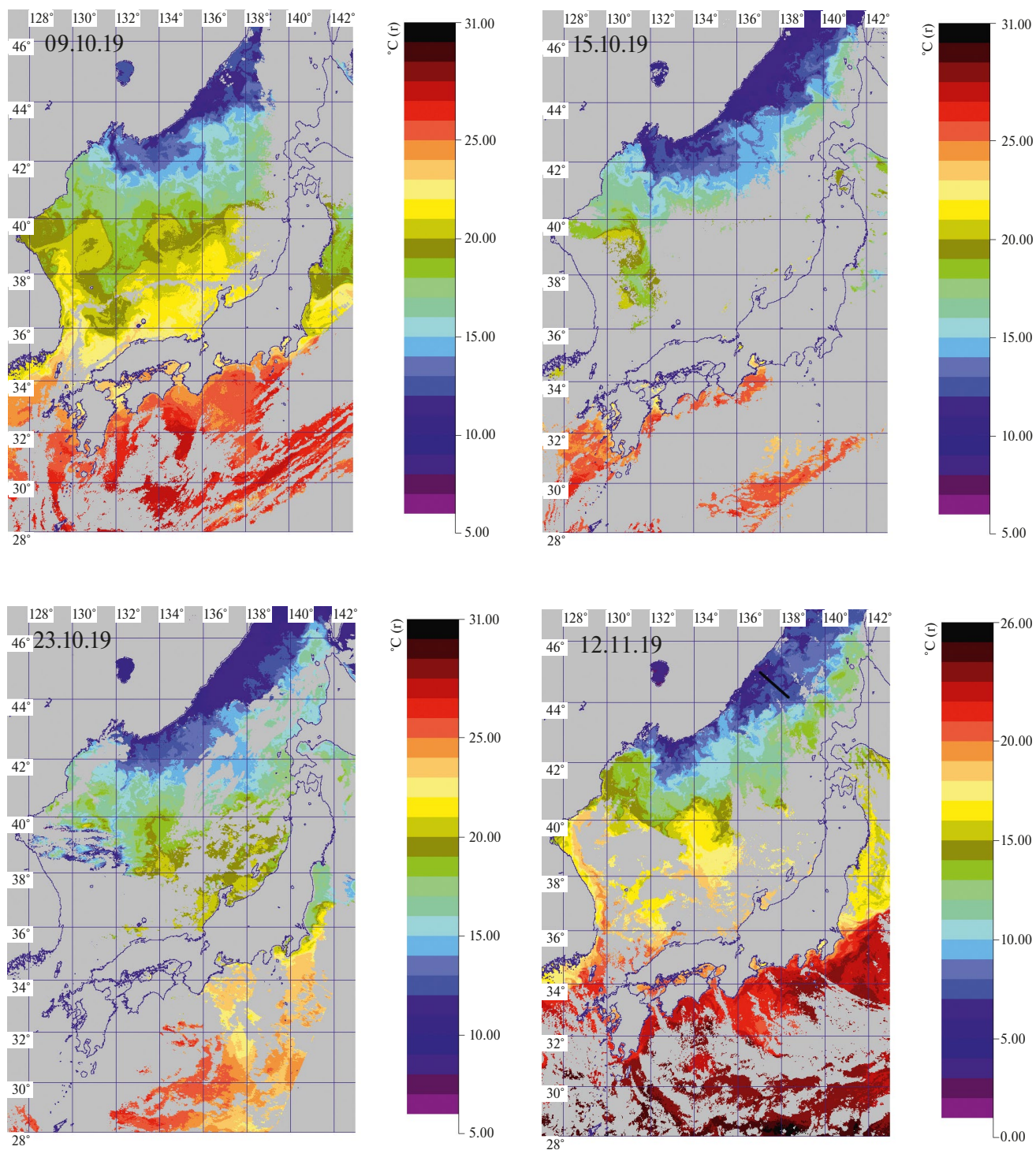


Рис. 2 (продолжение). Термическая структура поверхности Японского моря по данным спутниковых ИК-изображений в сентябре-ноябре 2019 г. и декабре 2021 г. В сентябре и октябре шкалы температур от 5°C до 31°C, в ноябре и декабре — от 0°C до 26°C. На снимке от 12 ноября 2019 г. черным отрезком обозначен разрез, результаты которого приведены на рис. 8.

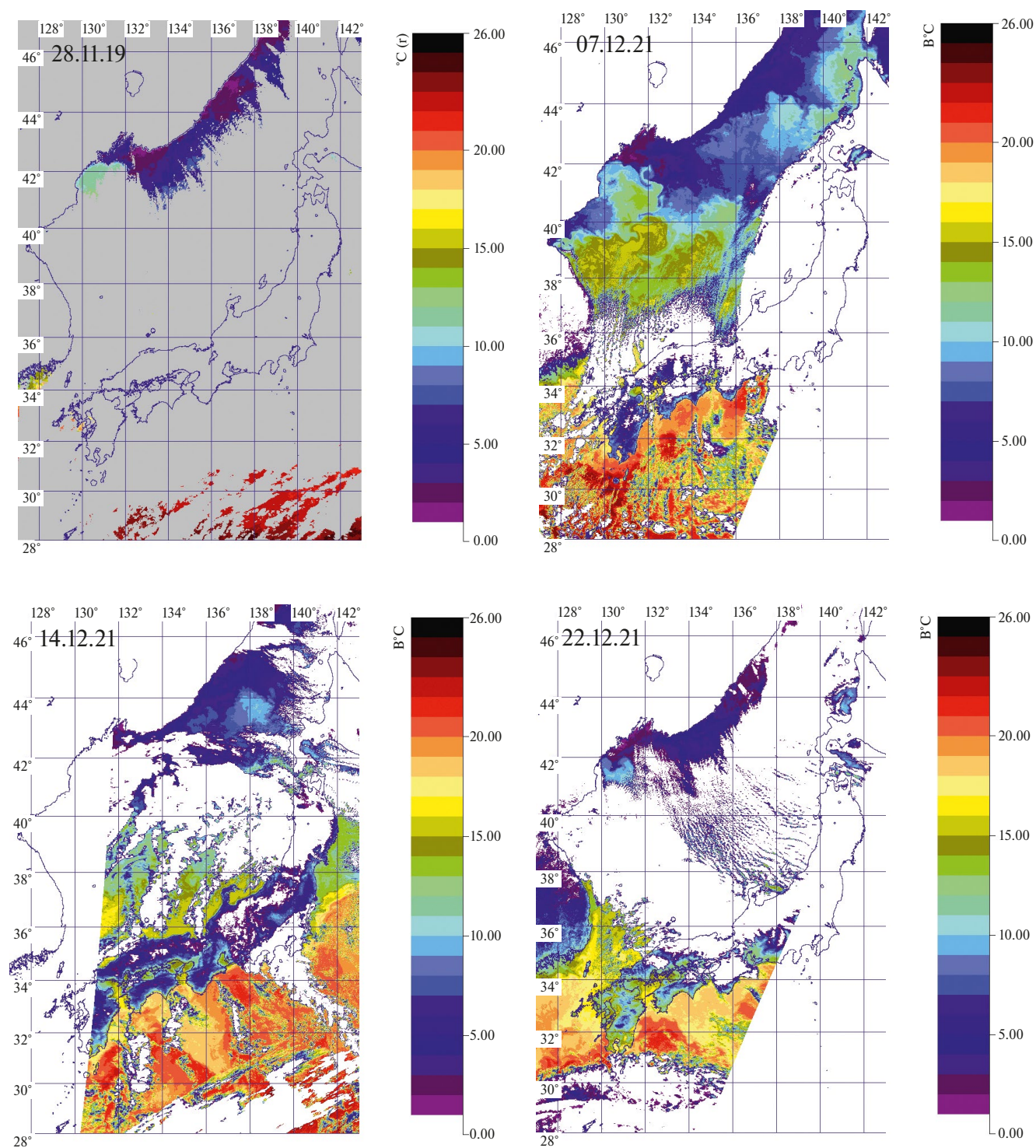


Рис. 2 (продолжение). Термическая структура поверхности Японского моря по данным спутниковых ИК-изображений в сентябре-ноябре 2019 г. и декабре 2021 г. В сентябре и октябре шкалы температур от 5°C до 31°C, в ноябре и декабре — от 0°C до 26°C. На снимке от 12 ноября 2019 г. черным отрезком обозначен разрез, результаты которого приведены на рис. 8.

поэтому результаты одной станции позволяют давать оценку развития Приморского апвеллинга вдоль побережья до 44° с.ш.).

Далее с 7 по 25 октября наблюдался процесс релаксации апвеллинга. Температура стала повышаться и достигла максимального значения 12.2°C , соленость же уменьшилась до 33.46 е.п.с. Затем последовало опять снижение температуры и повышение солености. К 28 ноября температура уменьшилась до 1.8°C и продолжила снижение и далее, а соленость возросла и превысила значение 34.00 е.п.с. Все это указывает на продолжение процесса апвеллинга после периода релаксации. Практическая же неизменность формы, площади и температуры аномальных областей свидетельствует, что релаксация прибрежного апвеллинга 7–25 октября заметно не повлияла на структуру поля ТПМ, наблюдаемую в октябре на спутниковых ИК-изображениях. Стабильность же структуры поверхностной температуры в октябре позволяет карту поверхностной температуры, построенную по данным судовой гидрологической съемки, выполненной за относительно длительное время 2–21 октября (рис. 4а), рассматривать как достаточно хорошо соответствующую спутниковым картам ТПМ за октябрь и наряду со спутниковыми ИК- снимками использовать для анализа гидрологических условий.

Особенности глубинного апвеллинга в области ЗЦК. В октябре 2019 г. гидрологическая ситуация к югу от Приморья по данным спутниковых ИК- изображений ТПМ и судовых измерений характеризовалась пониженными относительно мористых районов температурами и окружившими район работ вихревыми образованиями (рис. 4а). Минимальные температуры (ниже 11°C) на поверхности наблюдаются вблизи побережья, что обусловлено развивающимся здесь в осенний период

ветровым апвеллингом (рис. 3). Между областью с пониженными температурами и вихрями сформировалась фронтальная зона. Центральная же часть района работ на площадных распределениях температуры от нижнего горизонта зондирования (1000 м) и до горизонта 100 м оконтуривается замкнутыми изотермами, образующими примерно одинаковые по форме эллиптические двухъядерные области с пониженными температурами относительно соседних районов (рис. 4б, в).

На меридиональном и квазизональном разрезах, пересекающих район работ соответственно по 134° в.д. (рис. 5а) и с юго-запада от $41^\circ45'$ с.ш. $131^\circ48'$ в.д. на северо-восток до $43^\circ20'$ с.ш. $135^\circ56'$ в.д. (рис. 5б), наблюдается куполообразный подъем изотерм с общей вершиной в районе 42° с.ш. между меридианами 132° в.д. и 134.5° в.д., что свидетельствует о подъеме глубинных вод с нижних горизонтов измерений и почти до поверхности (примерно до 50 м). В результате подъема глубинных вод и сформировались области с пониженными температурами относительно соседних районов на площадных распределениях (рис. 4б, в). На разрезе северо-восточного направления (рис. 5б) в структуре глубинного апвеллинга наблюдаются две вершины. Для построения северо-восточного разреза, показанного ломаной линией на рис. 1а, на каждом из семи используемых разрезов выбиралась станция, на которой наблюдался максимальный на разрезе подъем изотерм. Поэтому северо-восточный разрез распределения температуры представляет вертикальный срез, проходящий по двухвершинному температурному хребту.

Примечательной особенностью выявленного в районе работ глубинного апвеллинга является то, что осевая линия, проходящая через центральную область подъема глубинных вод, выделяемого по минимальным температурам на площадных распределениях (рис. 4б, в), и направленная с юго-запада на северо-восток, совпадает с линией расположения подводных возвышенности Первенец и хребтов Берсенева и Васильковского (рис. 4з). Аналогичная особенность также проявилась и на основе данных декабрьской экспедиции 2021 г. рейса № 97 НИС “Академик М.А. Лаврентьев” (рис. 1б). На рис. 6а, б представлены площадные распределения температуры на горизонтах 300 м и 1000 м соответственно. К сожалению, из-за неблагоприятных метеоусловий не удалось выполнить разрез по 132° в.д. и западнее, что отразилось на качестве построенных полей температуры. Тем не менее в поле температур видно, что в декабре 2021 г. в глубинных слоях над возвышенностью Первенец и хребтами Берсенева и Васильковского в районе 42° с.ш. между 132° и 134.5° в.д. выделяются похожие на наблюдаемые в октябре 2019 г. структуры (рис. 4б, в; 6а, б). Все это указывает на

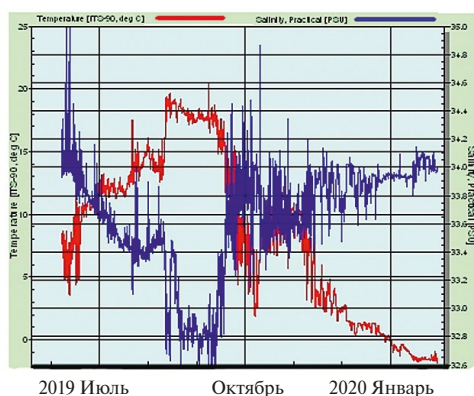


Рис. 3. Изменчивость температуры (красный цвет) и солености (синий цвет) на донной (22 м) мониторинговой станции, установленной 7 июня 2019 г. в береговой зоне южного Приморья к юго-западу от о. Русский.

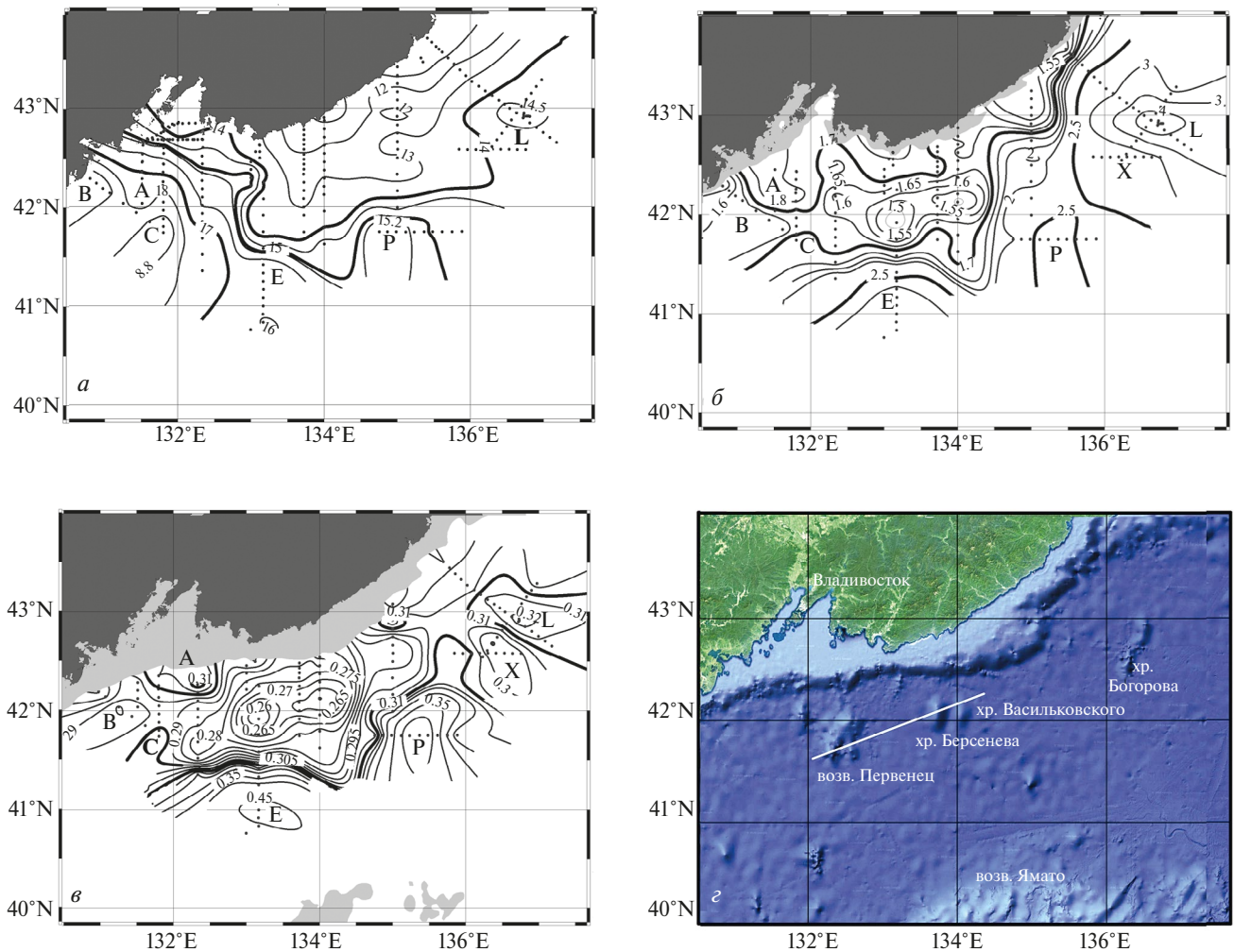


Рис. 4. Распределение потенциальной температуры воды в октябре 2019 г. на поверхности (*а*) и горизонтах 100 м (*б*) и 1000 м (*в*); рельеф дна района работ — белая линия, проходящая через возвышенность Первенец и хребты Берсенева и Васильковского, совпадает с осевой линией области максимального подъема глубинных вод, выделяемой по минимальным температурам на рисунках *б* и *в*–*г*. Точки (·) — местоположение станций. Латинскими буквами на рисунках *а*, *б* и *в* обозначены вихревые образования.

расположение здесь центральной области глубинного апвеллинга северо-западной части моря. Область апвеллинга распространяется и дальше на северо-восток до 135.5° в.д., отклоняясь все более в сторону побережья, как и в октябре 2019 г., и формируя еще одно ядро подъема вод в районе 43° с.ш. и 135° в.д. Выбор горизонта 300 м при построении площадного распределения температуры в декабре 2021 г. (рис. 6а) обусловлен тем, что на данной глубине квазизамкнутость изотерм проявляется отчетливо, в отличие от вышележащих горизонтов, где картина начинает затухать из-за интенсификации процессов в верхнем слое в декабре. Тем не менее в декабре 2021 года, в период нашей съемки в северо-западной части моря, где наблюдается глубинный апвеллинг, на спутниковых ИК снимках отчетливо просматривается

существование юго-западной области пониженных температур (рис. 2).

Свидетельством того, что подъем вод начинается от дна и распространяется до поверхностного слоя, является распределение температуры на разрезе по 134° в.д., который был, как отмечалось выше, выполнен в период 7–11 декабря 2021 г. до дна (рис. 7а). На рисунке над хребтом Васильковского, находящегося на линии разреза с вершиной примерно на глубине 1800 м (глубина у подошвы 3200 м) на $42^\circ 05'$ с.ш., наблюдается выраженный подъем изотерм. Такой же подъем изотерм от придонного до поверхностного слоя наблюдается над хребтом Васильковского на разрезе по 134° в.д., выполненном нами годом ранее в экспедиции НИС “Академик Опарин” (рейс № 62) 20–26 декабря 2020 г. (рис. 7б). В целом же структура поля температуры на разрезах

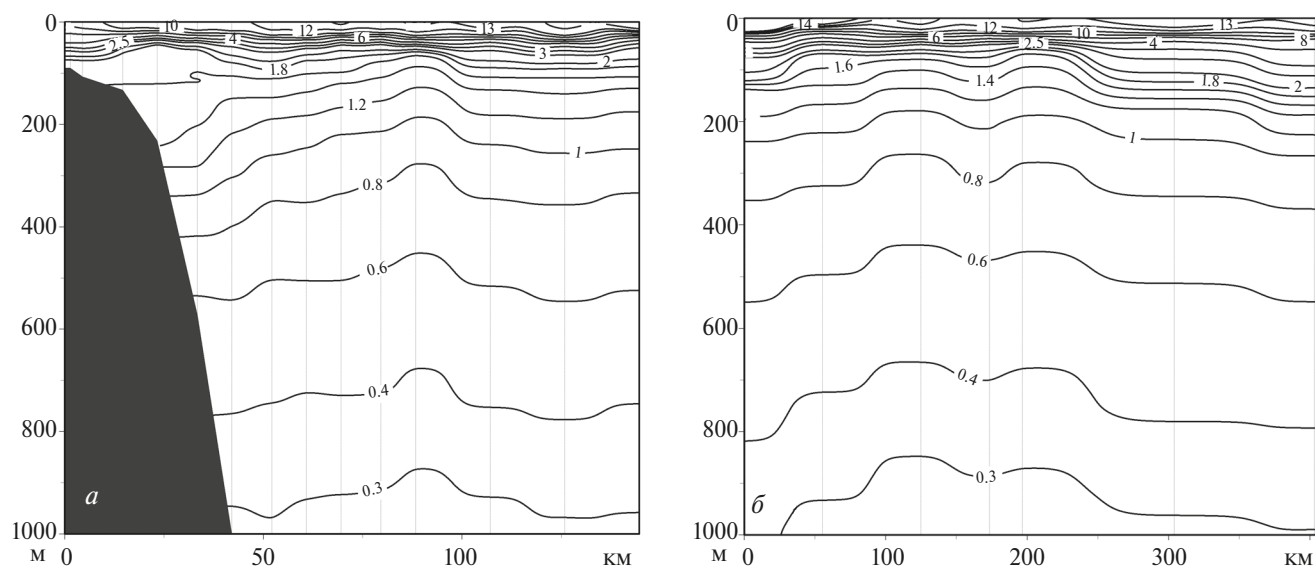


Рис. 5. Распределение потенциальной температуры на разрезе по 134° в.д. (а) и разрезе, направленном с юго-запада на северо-восток (рис. 1а) через центральную область глубинного апвеллинга (б) в октябре 2019 г. Вертикальные тонкие линии — местоположение станций.

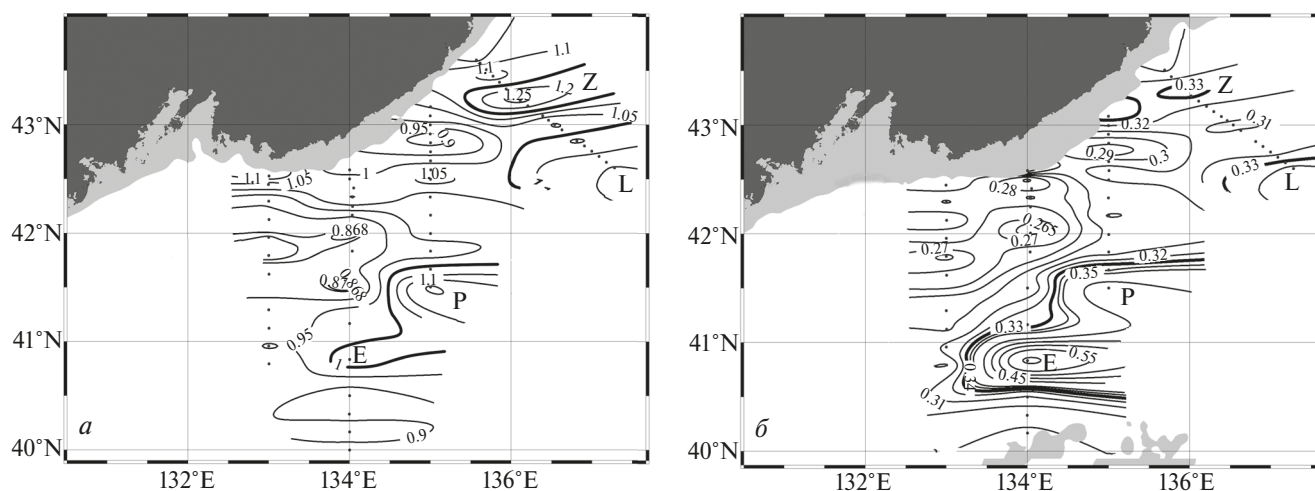


Рис. 6. Распределения потенциальной температуры на горизонтах 300 м (а) и 1000 м (б) в декабре 2021 г. Точки (·) — местоположение станций. Латинскими буквами на рисунках а и б обозначены вихревые образования.

по 134° в.д. одинакова, отличаясь, в основном, более сильной деформацией поля температуры в декабре 2021 г. за счет глубокого антициклона Е (рис. 7а, б) в южной половине разреза и двух небольших присклоновых вихревых образований с центрами на 42°20' с.ш. и 42°30' с.ш. (рис. 7а). Заметим также, что на рис. 7а, б глубина над хребтом Васильковского на разрезах отлична от реального значения из-за дрейфа судна, затрудняющего выполнение СТД-станций точно над вершиной.

Другой примечательной особенностью глубинного апвеллинга является то, что вытянутая с юго-запада на северо-восток центральная об-

ласть подъема глубинных вод, распространяясь все дальше на северо-восток до 135.5° в.д. и отклоняясь все более в сторону побережья в направлении залива Ольги, примерно совпадает с зоной дивергенции, отмеченной ранее (Яричин, Покудов, 1982; Яричин, 1982; Юрасов, Яричин, 1991), также отклоняющейся к побережью в направлении залива Ольги, как и зона апвеллинга. Эту дивергенцию (Васильев, Макашин, 1991) по результатам диагностического расчета интегральной циркуляции связывают с подъемом вод в области циклонической завихренности. На рис. 4б, в и 6а, б структура поля температуры в виде замкнутых изотерм в районе

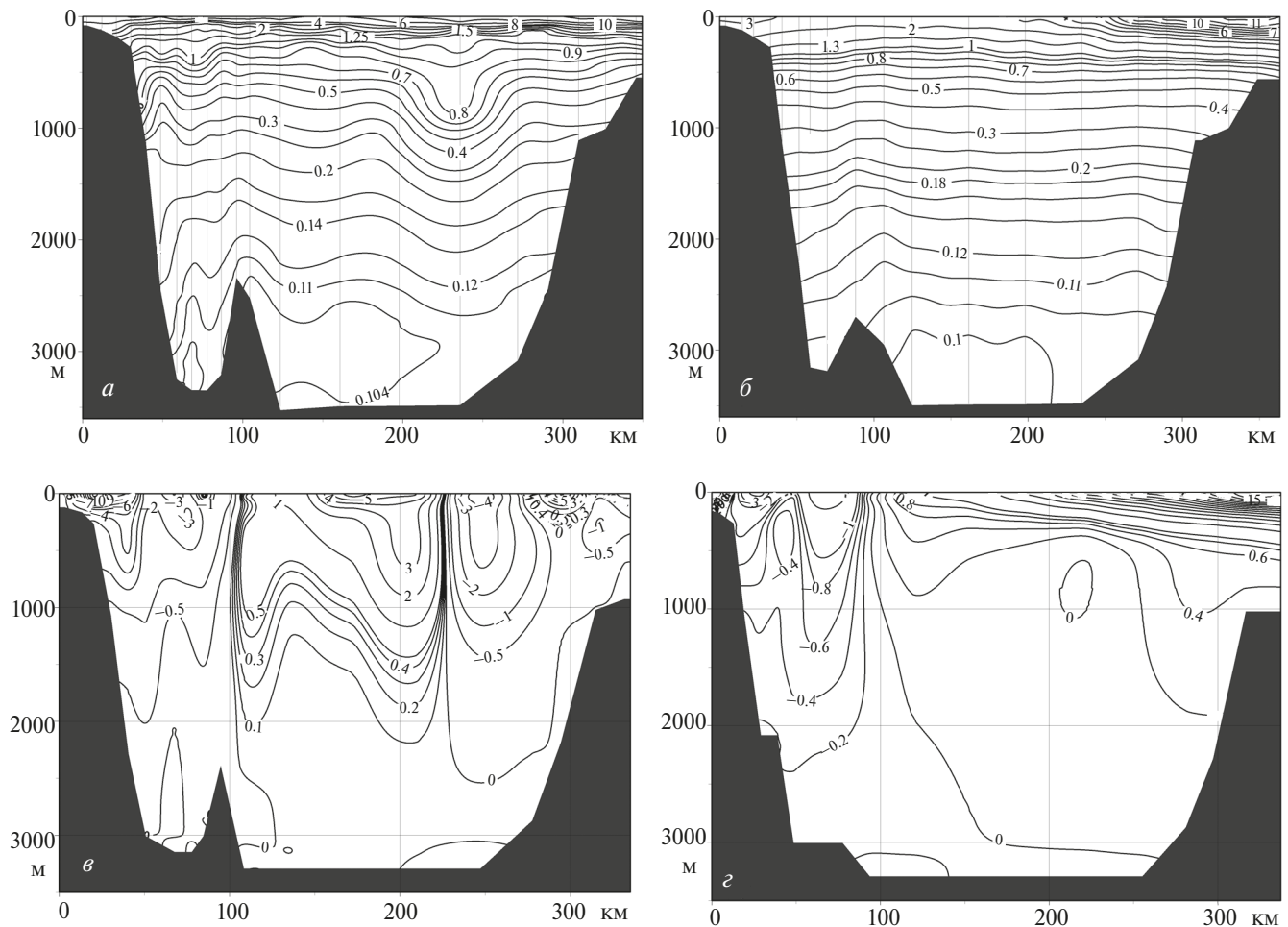


Рис. 7. Распределения потенциальной температуры (*а, б*) и зональной составляющей геострофической скорости (*в, г*) (знак плюс — поток направлен на восток, минус — на запад) на разрезах по 134° в.д. по данным экспедиций НИС “Академик М.А. Лаврентьев” (7–28 декабря 2021 г., рейс № 97) — *а* и *в* соответственно и НИС “Академик Опарин” (14–29 декабря 2020 г., рейс № 62) — *б* и *г* соответственно. Вертикальные тонкие линии на рис. *а* и *б* — местоположение станций.

42° с.ш. свидетельствует не только об апвеллинге, но также о нахождении здесь циклонического круговорота. Наличие циклонической циркуляции в районе работ над подводными поднятиями дна подтверждается распределением зональных составляющих геострофической скорости на разрезах по 134° в.д. (рис. 7*в, г*). Особенностью распределения зональных составляющих геострофической скорости на разрезах является ее повышенные значения в области расположения антициклона в южной половине разреза на рис. 7*а*, что наглядно свидетельствует о роли вихрей в увеличении скорости течений в глубинном слое моря.

На рис. 7*в, г* отчетливо видно, что нулевые изогаи разделяют западный и восточный потоки в районе расположения вершины апвеллинга и хребта Васильковского. Отсюда связанный с глубинным апвеллингом циклонический круговорот, расположенный в области ЗЦК, является крупным

топографическим вихрем, сформированным, вероятно, при взаимодействии набегающего потока с положительными формами рельефа дна (Козлов, Дарницкий, 1981; Зырянов, 1995; Дарницкий, 2010) — хребтами Васильковского, Берсенева и возвышенностью Первенец. Большая часть западного прибрежного потока — Приморского течения обтекает поднятия с севера, образуя северную периферию КЦК и ее западной структуры ЗЦК. В структуре топографического вихря выделяются два небольших по размеру циклонических вихря, центры которых связаны с двумя вершинами глубинного апвеллинга на рис. 4*б, в*. Эти вершины выделяются и в распределении температур на северо-восточном разрезе на рис. 5*б*. Один вихрь формируется над хребтами Васильковского и Берсенева, второй располагается между возвышенностью Первенец и хребтом Берсенева (рис. 4*б, в* и 6*а, б*). Экспериментальное выявление топографического

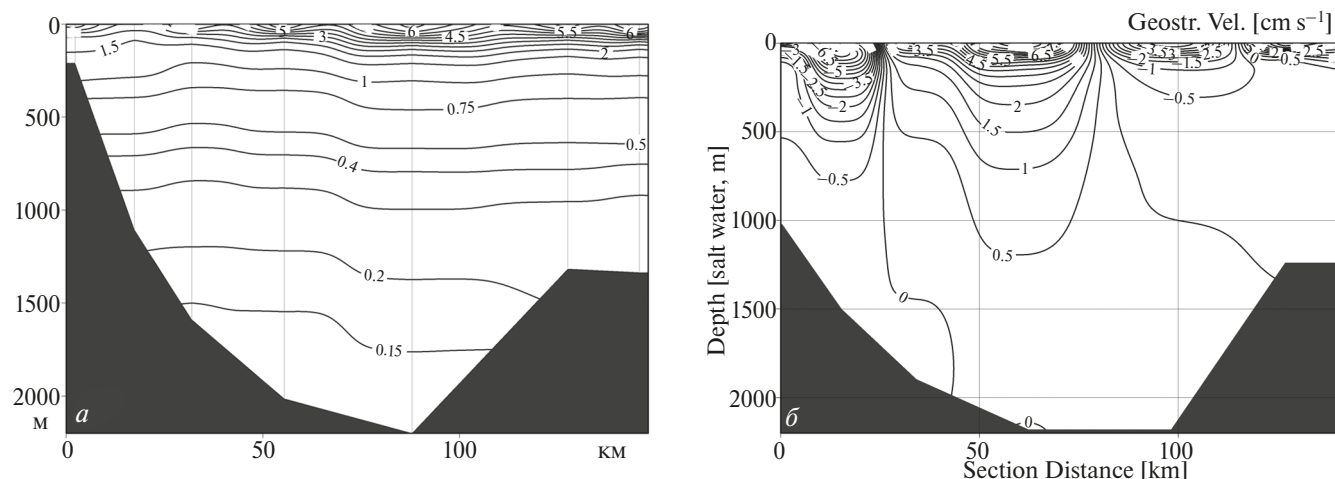


Рис. 8. Распределение потенциальной температуры (*а*) и скорости геострофических течений, перпендикулярной разрезу, выполненному 11–12 ноября 2019 г. в экспедиции НИС “Академик Опарин” (рейс № 58) в северо-восточной области пониженной температуры (*б*). Знак плюс — поток направлен на северо-восток, минус — на юго-запад. Вертикальные тонкие линии на рисунке *а* — местоположение станций. Разрез показан на спутниковом снимке от 12 ноября 2019 г. на рис. 2.

фактора в формировании циклонического круговорота и апвеллинга в западной части КЦК пришлось на осенний и зимний сезоны. На данный момент отсутствуют аналогичные исследования в весенне-летний период, что не позволяет сделать однозначные выводы о соотношении факторов циклонической завихренности и топографии в происхождении глубинного апвеллинга и сезонной изменчивости его местоположения.

Глубинный апвеллинг в северо-восточной области пониженной температуры. Как уже отмечалось в начале статьи, в северо-восточной области пониженной температуры у берегов Приморья, выделяемой на основе спутниковых снимков примерно между 43° и 46° с.ш. и 135° и 139° в.д., в поле поверхностной геострофической циркуляции (Никитин и др., 2020; Никитин и др., 2012) выявляется в области КЦК еще один малый циклонический круговорот — северный (СЦК). В ноябре 2019 г. в рейсе № 58 НИС “Академик Опарин” в этом районе был выполнен гидрологический разрез до дна (рис. 8), расположение которого показано на рис. 2 на снимке от 12 ноября 2019 г. отрезком черного цвета. Разрез перпендикулярен береговой черте и потокам у восточного побережья Приморья. На разрезе наблюдается подъем вод от дна и до поверхности, причем глубинный апвеллинг смещен на континентальный склон. Наличие циклонического круговорота в северо-восточной области пониженной температуры у берегов Приморья в ноябре 2019 г. подтверждается юго-западным у побережья и северо-восточным мористее геострофическими потоками (рис. 8б), а также наличием фронта, сформированного цусимскими теплыми

водами и водами аномальной области и опоясывающего последнюю, что отчетливо просматривается на спутниковых картах ТПМ за 12 и 28 ноября 2019 г. (рис. 2).

Роль глубинного апвеллинга и вихрей в интенсификации глубинной циркуляции. В октябре 2019 г. установленный в районе подводных поднятий дна западный циклонический круговорот (ЗЦК) с запада, юга, юго-востока и востока был окружен четырьмя вихревыми областями, в которых можно выделить пять основных антициклонических вихрей: А, С, Е, Р, L, наблюдаемых от поверхности до нижнего горизонта измерений (1000 м) (рис. 4а, б, в). Эти вихри отчетливо просматриваются на спутниковом ИК-изображении от 9 октября 2019 г. (рис. 9а). В декабре 2021 г. центральная область апвеллинга также была окружена антициклоническими вихрями, расположенными примерно в тех же местах: с юга от центральной части апвеллинга расположился вихрь Е, с юго-востока — Р и востока — L. Северо-западнее вихря L находится прибрежный вихрь Z (рис. 6а, б). Для вихрей мы используем те же обозначения, что и на схеме расположения вихрей, построенной авторами (Никитин, Юрасов, 2008) по спутниковым данным за 1988–1996 гг. (рис. 9б). В нашей работе и в статье (Никитин, Юрасов, 2008) положение одноименных вихрей (А, С, Е, Р, L) в целом совпадает, что указывает на существование определенной закономерности в расположении вихрей в виде квазиширотного вихревого пояса, окружившего область ЗЦК с мористой стороны. Назовем его малым вихревым поясом или МВП. Этот антициклонический пояс имеет небольшой “дефект” в виде залегающего между

антициклонами Р и L над хребтом Богорова циклонического топографического вихря Х (рис. 4б, в, г) (Лобанов и др., 2021). Антициклонические образования А, С, Е, Р и L в северной половине моря тесно связаны с квазимеридиональными вихревыми цепочками, которые, в свою очередь, являются достаточно устойчивыми структурными образованиями, наблюдаемыми в течение года и расположенными примерно в одних и тех же местах. Цепочки и связанные с ними теплые субтропические воды ориентируются приблизительно вдоль 131° в.д., 134° в.д. и 137° в.д., а в восточной части моря — между 42° – 44° с.ш. от 139° в.д. до 135° в.д. (Никитин и др., 2002; Никитин, Юрасов, 2008; Пранц и др., 2018). В нашем случае в октябре 2019 г. цепочки сохраняли структуру и направление, как отмечено выше. Цепочка по 131° в.д., состоящая из вихрей G, D, C, B и A, была ориентирована на север, а направления цепочек по 134° в.д., включающих вихри Y2 и E, и по 137° в.д. с вихрями N, M и P были несколько отклонены на северо-запад, но в целом согласовывались с указанными выше особенностями расположения вихревых цепочек и путей распространения субтропических вод в северную часть моря (рис. 9а). Цепочка, расположенная в северо-восточной части КЦК, состоит из вихрей L и, предположительно, S и T (рис. 9а). Район формирования этих вихрей (рис. 9б) расположен в северной части моря к северу от 43° с.ш. между 138° – 140° в.д. (Никитин и Юрасов, 2008). Смещение данной цепочки в юго-западном направлении в октябре 2019 г., вероятно, связано с возникновением ветрового прибрежного апвеллинга и раз-

витиим северного циклонического круговорота (СЦК), примыкающего к побережью Приморья между 43° и 46° с.ш. (рис. 9а).

Важнейшим элементом цепочек Японского моря являются семь крупных квазистационарных антициклонических образований (Никитин, Юрасов, 2008), из которых пять (B, G, Y2, N и L) окружают западный и восточный круговороты в области КЦК (рис. 9). Причем, вихри B, G, Y2 и N, окружая КЦК с запада и юга, формируют свой квазиширотный вихревой пояс — большой вихревой пояс (БВП). На спутниковом снимке от 9 октября 2019 г. в период наших работ можно выделить квазистационарные вихри B, G, Y2, N и L (рис. 9а), расположение которых примерно совпадает с расположением вихрей на схеме (рис. 9б) авторов (Никитин и др., 2002; Никитин, Юрасов, 2008) за исключением вихря L, который сместился из района формирования приблизительно в координатах 44° с.ш. и 138° в.д. (Никитин и др., 2012) в точку с координатами 43° с.ш. и 137° в.д. Квазистационарные вихри являются источником струйных выбросов или промежуточным звеном для вовлечения струй с дальнейшей передачей вторгшихся субтропических вод другим вихрям цепочки, расположенных севернее, которые имеют меньший диаметр и продолжительность жизни, но по вертикали распространяются практически до дна (Лобанов и др., 2007; Никитин, Юрасов, 2008). По северной периферии квазистационарных вихрей, образующих БВП, проходит субарктический фронт (Никитин и др., 2012). Причем фронтальная

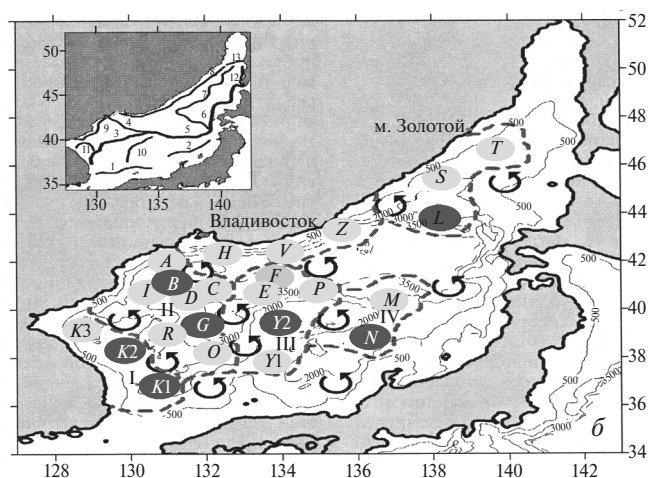
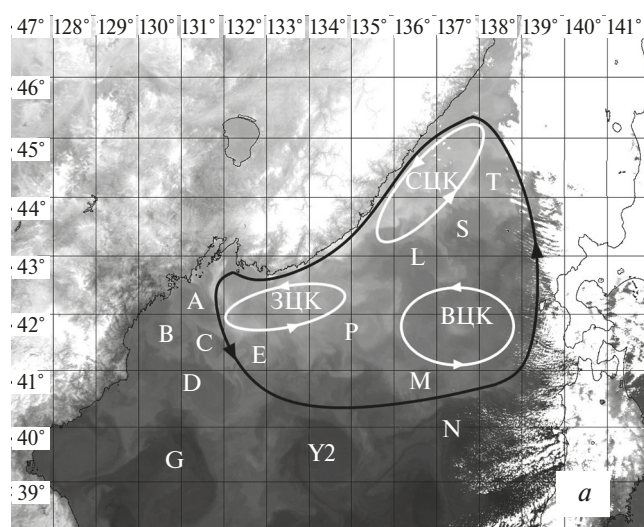


Рис. 9. а — изображение северной половины Японского моря в ИК-диапазоне со спутника NOAA за 9 октября 2019 г. Латинскими буквами на рисунке обозначены антициклонические вихревые образования; черной линией оконтурена область КЦК; белыми линиями — циклонические круговороты: западный (ЗЦК), восточный (ВЦК) и северный (СЦК). б — рисунок из (Никитин, Юрасов, 2008). Латинскими буквами на рисунке обозначены антициклоны, установленные по спутниковым данным за 1988–1996 гг. Затемненными кружками обозначены квазистационарные антициклоны. На вставке — обобщенная схема поверхностных термических фронтов в Японском море.

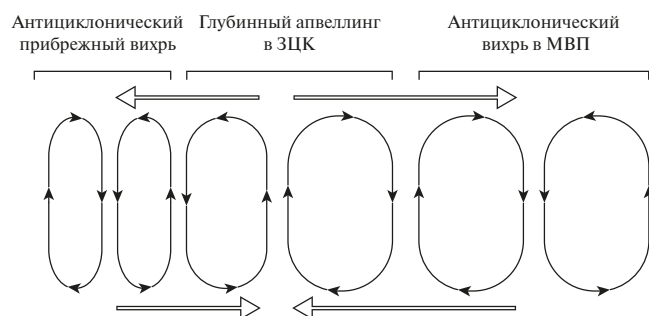


Рис. 10. Упрощенная схема вертикальной циркуляции на разрезе по 134° в.д. в декабре 2021 г.

субарктическая зона с севера формируется из вод КЦК, а с южной стороны из субтропических вод БВП. Аналогичным образом МВП взаимодействует с ЗЦК, формируя свой фронт (рис. 4а, б, в). Взаимодействие осуществляется однонаправленными потоками южной периферии ЗЦК и северной периферии вихрей МВП. По северной периферии вихрей L, S и T, образующих еще один малый вихревой пояс, проходит фронт, разделяющий воды СЦК и воды указанных вихрей. В работе (Никитин и др., 2012) на данном фронте в ноябре 2003 г. наблюдались максимальные геострафические скорости. Такая же картина наблюдалась и по расчетам для мая 2013 г. (Никитин и др., 2020). Выявленный в 90-е годы посредством буев ВЦК (Данченков и др., 2005) на снимке от 9 октября 2019 г. окружен с трех сторон вихрями (N, M, P, L и S), периферии которых однонаправленными потоками с водами круговорота формируют также локальную зону фронта. Таким образом, вихревые пояса и циклонические круговороты неразрывно связаны и взаимодействуют однонаправленными потоками.

В декабре-феврале в субарктической зоне моря в верхнем слое наблюдается интенсификация КЦК (Takematsu et al., 1999a; Kang et al., 2000; Трусенкова и др., 2007; Таранова и др., 2018) и, соответственно, входящих в него круговоротов, что обуславливается положительными значениями завихренности касательного напряжения ветра и усилением ветров северных румбов от осени к зиме. Усиление циклонических круговоротов приводит к интенсификации апвеллингов, связанных с круговоротами, в верхнем слое. В тоже время тесное взаимодействие круговоротов и вихревых поясов должно сказаться и на динамике входящих в пояса вихрей. В рамках гипотезы о вихревой природе интенсификации глубинной циркуляции (Hogan, Hurlburt, 2000) в северной половине моря в зимний период возможная интенсификация вихрей — это только часть механизма увеличения скорости глубинных вод от октября к марту. Интенсификация круговоротов в зимний период, приводя к усилению апвел-

лингов в верхнем слое, также усиливает вертикальную и поперечную горизонтальную циркуляцию, в частности, в ЗЦК. На рис. 10 представлена упрощенная схема вертикальной циркуляции на разрезе по 134° в.д. в декабре 2021 г., построенная на основе распределения температуры на рис. 7а. Структура вертикальной циркуляции на разрезе, пересекающем ЗЦК и антициклонический вихрь МВП с юга, а также небольшой антициклонический вихрь между побережьем и ЗЦК с севера, представляет собой совокупность циркуляционных ячеек. Ячейки охватывают всю водную толщу разнонаправленной вертикальной и поперечной горизонтальной циркуляцией, формирующей в верхнем слое ЗЦК и антициклонических вихрей, соответственно, зоны дивергенции и конвергенции вод, а в нижнем слое, соответственно, зоны конвергенции и дивергенции. На рис. 10 видно, что усиление апвеллинга в верхнем слое будет усиливать конвергенцию вод в нижнем слое, увеличивая скорость течения. Это усиление с мористой стороны от ЗЦК осуществляется через антициклонический вихрь, который, распространяясь до дна, деформирует придонный конвективный слой и область апвеллинга в поле температуры (рис. 7а). С компенсационным вихревым потоком энергии и массы воды из верхних слоев в глубинные в условиях усиливающегося от осени к зиме глубинного апвеллинга связан, вероятно, наибольший вклад в интенсификацию глубинной циркуляции в районе Японской котловины в зимний период. Характер же интенсификации монотонное увеличение средней скорости глубинных вод от минимума в октябре до максимума в марте (Choi, Yoon, 2010) определяется, вероятно, особенностью развития вертикальной и поперечной горизонтальной циркуляции, которое происходит постепенно по мере накачки вихревой энергии и компенсационного потока вышележащих вод в глубинные слои в течение всего зимнего периода в условиях идущего усиления северо-западных ветров к февралю-марту до смены зимнего муссона на летний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спутниковые ИК-изображения, гидрологические съемки и измерения на мониторинговой донной станции в прибрежной зоне южного Приморья позволили выявить и рассмотреть малоизученные особенности структуры и динамики вод в северной половине Японского моря в осенне-зимний период 2019–2021 г. Одной из таких особенностей является ежегодное образование в осенне-зимний период в КЦК двух аномальных термических областей. Данное явление наблюдается после смены летнего муссона на зимний и возникновении осеннего ветрового прибрежного апвеллинга. Расположение

данных термических структур совпадает с расположением западного (ЗЦК) и северного (СЦК) циклонических круговоротов, неразрывно связанных с глубинным апвеллингом. Глубинный апвеллинг в северо-западной части Японского моря распространяется от дна до поверхностного слоя, фокусируясь вдоль осевой линии, проходящей через возвышенность Первенец и хребты Берсенева и Васильковского в районе 42° с.ш. между 132° в.д. и 135.5° в.д. Область подъема, распространяясь в направлении побережья к заливу Ольги, примерно совпадает с зоной дивергенции в западной части крупномасштабного циклонического круговорота (КЦК) — акватории, где располагается малый западный циклонический круговорот (ЗЦК). Связанный с глубоководным апвеллингом ЗЦК является крупным топографическим вихрем, сформированным, вероятно, при взаимодействии Приморского течения с положительными формами рельефа дна — хребтами Васильковского, Берсенева и возвышенностью Первенец.

Глубоководный разрез, выполненный в северо-восточной области пониженной температуры, где также наблюдается СЦК, показал, что глубоководный апвеллинг в этой части КЦК смещен на континентальный склон.

В осенне-зимний период КЦК и входящие в него малые циклонические круговороты ЗЦК, ВЦК и СЦК окружены большим и малыми вихревыми поясами (БВП и МВП), сформированными квазимеридиональными вихревыми цепочками. Круговороты и пояса неразрывно связаны и на перифериях образуют фронтальные зоны, в которых они взаимодействуют однонаправленными потоками. Предполагается в рамках гипотезы о вихревой природе интенсификации глубинной циркуляции (Hogan, Hurlburt, 2000), что взаимодействие вихревых поясов с циклоническими круговоротами приводит в зимний период к усилению глубинной циркуляции. Особенность изменчивости скорости глубинных вод — увеличение от октября к марту, вероятно, обусловлено характером развития вертикальной и поперечной горизонтальной циркуляции в системе циклонических круговороты — вихревые пояса в результате интенсификации глубинного апвеллинга при усилении ветров северных румбов в зимний период.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнялась в рамках госбюджетной темы НИР ТОИ ДВО РАН на 2023 г. по теме “Исследование основных процессов, определяющих состояние и изменчивость океанологических характеристик окраинных морей Азии и прилегающих районов Тихого и Индийского океанов”, рег. номер 121021700346-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексанин А.И., Алексанина 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. М.: Азбука -2000, 2006. Т. 2. Вып. 3. С. 9–15.
- Баталин А.М. Плотность // Гидрологический справочник морей СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1958. Т. 8. Вып. 2. С. 244–263.
- Ванин Н.С. Аномальные термические условия северо-западной части Японского моря осенью 2003 г. // Изв. ТИНРО. 2004. Т. 138. С. 345–354.
- Васильев А.С., Макашин В.П. Вентиляция вод Японского моря в зимний период // Метеорол. и гидрол. 1991. № 2. С. 71–79.
- Гончаренко И.А., Федеряков В.Г., Лазарюк А.Ю., Пономарев В.И. Тематическая обработка данных AVHRR на примере изучения прибрежного апвеллинга // Исслед. Земли из космоса. 1993. № 2. С. 97–108.
- Данченков М.А., Райзер С.С., Юн Д.-Х. Глубинные течения центральной части Японского моря // Подвод. технолог. и мир океана. 2005. № 3. С. 58–63.
- Дарницкий В.Б. Океанологические процессы вблизи подводных гор и хребтов открытого океана. Владивосток: ТИНРО-Центр. 2010. 199 с.
- Жабин И.А., Грамм-Осипова О.Л., Юрасов Г.И. Ветровой апвеллинг у северо-западного побережья Японского моря // Метеорол. и гидрол. 1993. № 10. С. 82–86.
- Зырянов В.Н. Топографические вихри в динамике морских течений. М.: ИВП РАН. 1995. 240 с.
- Истошин Ю.В. Температура воды Японского моря и возможность ее прогноза // Тр. океанографической комиссии АН СССР. 1960. Т. 7. С. 52–97.
- Козлов В.Ф., Дарницкий В.Б. Топографический циклогенез в океане // Тр. ДВНИИ. 1981. Вып. 83. С. 85–100.
- Леонов А.К. Водные массы Японского моря // Метеорол. и гидрол. 1948. № 6. С. 61–78.
- Леонов А.К. Японское море. Региональная океанография. Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат. 1960. С. 291–463.
- Лобанов В.Б., Пономарев В.И., Салюк А.Н., Тищенко П.Я., Талли Л.Д. Структура и динамика синоптических вихрей северной части Японского моря // Дальневосточные моря России. Кн.1. Океанологические исследования / Гл. ред. В.А. Акуличев. М.: Наука. 2007. С. 450–473.
- Лобанов В.Б., Сергеев А.Ф., Навроцкий В.В., Воронин А.А., Горин И.И., Павлова Е.П. Инструментальные наблюдения каскадинга на склоне залива Петра Великого Японского моря // Труды конференции: “Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2019)”. Том 1. М.: ИО РАН, 2019. С. 104–108.
- Лобанов В.Б., Сергеев А.Ф., Шлык Н.В., Воронин А.А., Горин И.И., Цой В., Горячев В.А., Крайников Г.А., Зверев С.А., Рудых Я.Н., Марьина Е.Н., Прушковская И.А., Лукьянова Н.Б., Теличко А.С. Синоптическая динамика вод северо-западной части Японского моря в осенний период (по результатам 57-го рейса НИС “Академик Опарин”) // Физика геосфер. Двенадцатый Всероссийский симпозиум, 6–10 сентября 2021 г. Владивосток, Россия, 2021. С. 71–73. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.poi.dvo.ru/conf/phg2021>.

- Методические указания по комплексному использованию спутниковой информации для изучения морей // Л.: Гидрометеиздат, 1987. 144 с.
- Мокиевская В.В. Химическая характеристика водных масс // Основные черты геологии и гидрологии Японского моря / Отв. ред. В.Н. Степанов. М.: Изд-во АН СССР. 1961. С. 122–131.
- Никитин А.А., Лобанов В.Б., Данченков М.А. Возможные пути переноса теплых субтропических вод в район Дальневосточного морского заповедника // Изв. ТИНРО. 2002. 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., Данченков М.А., Лобанов В.Б., Юрасов Г.И. Новая схема поверхностной циркуляции Японского моря с учетом синоптических вихрей // Изв. ТИНРО. 2009 г. Т. 157. С. 158–167.
- Никитин А.А., Юрасов Г.И., Ванин Н.С. Спутниковые наблюдения синоптических вихрей и геострафическая циркуляция вод Японского моря // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 2. С. 28–40.
- Никитин А.А., Юрасов Г.И. Поверхностные термические фронты в Японском море // Изв. ТИНРО. 2017 г. Т. 148. С. 170–192.
- Никитин А.А., Дьяков Б.С., Капиштер А.В. Приморское течение на стандартных разрезах и спутниковых изображениях Японского моря // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 1. С. 31–43.
- Панфилова С.Г. Температура вод // Основные черты геологии и гидрологии Японского моря / Отв. ред. В.Н. Степанов. М.: Изд-во АН СССР. 1961 С. 155–169.
- Покудов В.В., Манько А.Н., Хлусов А.Н. Особенности гидрологического режима вод Японского моря в зимний период // Тр. ДВНИГМИ. 1976. Вып. 60. С. 74–115.
- Покудов В.В., Тунеголовец В.П. Новая схема течений Японского моря для зимнего периода // Тр. ДВНИИ. 1975. Вып. 50. С. 24–32.
- Пранц С.В., Улейский М.Ю., Будянский М.В. Лагранжев анализ путей переноса субтропических вод к берегам Приморья // ДАН. 2018. Т. 481. № 6. С. 666–670.
- Рекомендации по использованию спутниковых ИК снимков в океанологических исследованиях // Владивосток. ТИНРО. 1984. 43 с.
- Сергеев А.Ф., Матвеев В.И., Лобанов В.Б., Горин И.И., Котенко Б.М., Стариков А.Г. Изменчивость придонной температуры воды в прибрежной зоне Приморья в 2003–2007 гг. // Тез. докл. третьей Межд. науч.-практ. конф. “Морские прибрежные экосистемы. Водоросли, беспозвоночные и продукты их переработки”. Владивосток. ТИНРО-Центр. 2008. С. 207–208.
- Степанов В.Н. Общая характеристика гидрологии Японского моря // Основные черты геологии и гидрологии Японского моря / Отв. ред. В.Н. Степанов. М.: Изд-во АН СССР. 1961 С. 102–107.
- Таранова С.Н., Юрасов Г.И., Жабин И.А. Сезонная изменчивость поверхностной циркуляции вод северной части Японского моря по данным дрейфующих буев // Изв. ТИНРО. 2018. Т. 192. С. 177–183.
- Трусенкова О.О. Сезонные и межгодовые изменения циркуляции вод Японского моря // Дальневосточные моря России. Кн.1. Океанологические исследования / Гл. ред. В.А. Акулиничев. М.: Наука. 2007. С. 280–306.
- Трусенкова О.О. Моделирование глубинных течений Японского моря: взаимосвязь с течениями в пикноклине // Изв. ТИНРО. 2018 г. Т. 192. С. 184–201.
- Трусенкова О.О., Станичный С.В., Ратнер Ю.Б. Основные моды изменчивости и типовые поля ветра над Японским морем и прилегающими районами суши // Изв. РАН. ФАО. 2007. Т. 43. № 5. С. 688–703.
- Юрасов Г.И. Особенности структуры и динамики вод северной части Японского моря. Тихоокеан. Океанол. Ин-т ДВНЦ АН СССР. Владивосток. 1995. 28 с. Деп. ВИНТИ 27.01.95. № 468-B95.
- Юрасов Г.И., Ванин Н.С., Рудых Н.И. Климатические характеристики течений Японского моря по данным расчетов динамическим методом // Изв. ТИНРО. 2011. Т. 164. С. 340–347.
- Юрасов Г.И., Яричин В.Г. Течения Японского моря. Владивосток. Изд-во ДВО АН СССР. 1991. 174 с.
- Яричин В.Г. Некоторые особенности горизонтального движения вод в Японском море к северу от 40° с.ш. // Тр. ДВНИИ. 1982. Вып. 96. С. 111–121.
- Яричин В.Г., Покудов В.В. Формирование структурных особенностей гидрофизических полей и течений в северной глубоководной части Японского моря // Тр. ДВНИИ. 1982. Вып. 96. С. 86–95.
- Choi Y.J., Yoon J.-H. Structure and seasonal variability of the deep mean circulation of the East Sea (Sea of Japan) // J. Oceanogr. 2010. V. 66. Is. 3. P. 349–361.
- Hogan P.J., Hurlburt H.E. Impact of upper ocean–topographical coupling and isopycnal out-cropping in Japan/East Sea models with 1/8° to 1/64° resolution // J. Phys. Oceanogr. 2000. V. 30. № 10. P. 2535–2561.
- Kang S.K., Seung Y.H., Park J.J., Park J.-H., Lee J.H., Kim E.J., Kim Y.H., Suk M.-S. Seasonal variability in middepth gyral circulation patterns in the central East/Japan Sea as revealed by long-term Argo data // J. Phys. Oceanogr. 2000. V. 46. P. 937–946. DOI: 10.1175/JPO-D-15-0157.1
- Senjyu T., Shin H.-R., Yoon J.-H., Nagano Z., An H.-S., Byun S.-K., Lee C.-K. Deep flow field in the Japan/East Sea as deduced from direct current measurements // Deep Sea Res. II. 2005. V. 52. No. 11–13. P. 1726–1741.
- Schlitzer R. Ocean Data View. 2019. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://odv.awi.de>.
- Takematsu M., Nagano Z., Ostrovskii A.G., Kim K., Volkov Y. Direct Measurements of Deep Currents in the Northern Japan Sea // Journal of Oceanography. 1999. V. 55. No. 2. P. 207–216.
- Takematsu M., Ostrovskii A.G., Nagano Z. Observations of Eddies in the Japan Basin Interior // Journal of Oceanography. 1999. V. 55. No. 2. P. 237–246.
- Talley L.D., Lobanov V., Ponomarev V., Salyuk A., Tishchenko P., Zhabin I., Riser S. Deep convection and brine rejection in the Japan Sea // Geophys. Res. Lett. 2003. Vol. 30. No. 4. P. 1–4. DOI: 10.1029/20002GL016451.
- Talley L. D., Tishchenko P., Luchin V., Nedashkovskiy A., Sagalaev S., Kang D.-J., Warner M. and Min D.-H. Atlas of Japan (East) Sea hydrographic properties in summer, 1999: Supplementary material // Progress in Oceanography. 2004. V. 61. Is. 2–4. P. 277–348. DOI:10.1016/j.pocan.2004.06.011.
- Yoon J.-H., Abe K., Ogata T., Wakamatsu Y. The effects of wind-stress curl on the Japan/East Sea Circulation // Deep Sea Res. II. 2005. V. 52. No. 11–13. P. 1827–1844.

Features of the Structure and Dynamics of Water in the Northern Half of the Sea of Japan in Autumn-Winter Period According to Satellite Data and Ship Observation

A. F. Sergeev¹, V. B. Lobanov¹, V. A. Goryachev¹, N. V. Shlyk¹, E. N. Maryina¹, N. B. Lukyanova¹,
I. I. Gorin¹, V. Tsoy¹, S. A. Zverev¹, A. Yu. Yurtsev², I. A. Prushkovskaya¹, S. Yu. Ladychenko¹

¹*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute (POI FEB RAS), Vladivostok, Russia*

²*National Operator of Research Fleet, Vladivostok, Russia*

The results of studies of the structure and dynamics of water in the zone of a large-scale cyclonic gyre in the northern half of the Sea of Japan are presented, where satellite IR images annually in the autumn-winter period most clearly show two areas of low temperatures, separated by the influx of warm Tsushima waters from Japan. The location of these thermal structures coincides with the location of the western and northern cyclonic gyres, which are inextricably linked with deep upwelling. During the autumn-winter periods 2019–2021 it has been established that deep upwelling in the northwestern part of the Sea of Japan extends from the bottom to the surface layer, focusing along the axial line passing through the Pervenets Rise and the Bersenev and Vasilkovsky ridges in the area of 42° N. between 132° E and 135.5° E. The western cyclonic gyre, located in the western part of the large-scale cyclonic gyre in the region of the considered deep upwelling, is a large topographic eddy. In the northern part of the large-scale cyclonic gyre, deep upwelling is confined to the continental clone, and the small northern cyclonic gyre is also located there. It is assumed that in the autumn-winter period the interaction of anticyclones that form vortex belts with cyclonic gyres leads to an increase in deep circulation. The peculiarity of the variability of the speed of deep currents – an increase from October to March, is probably due to the nature of the development of vertical and transverse horizontal circulation in the system of cyclonic gyres – vortex belts as a result of the intensification of deep upwelling with increased winds from the northern directions in winter.

Keywords: infrared satellite images, anomalous thermal regions, upwelling, cyclonic gyres, topographic eddy, anticyclonic eddies, vertical and transverse horizontal circulation

REFERENCES

- Aleksanin A.I., Aleksanina M.G.* Monitoring termicheskikh struktur poverhnosti okeana po dannym IK-kanala sputnikov NOAA na primere Prikuril'skogo rayona Tihogo okeana // *Sovremennyye problem dstantsyonnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. Fizicheskiye osnovy, metody i tehnologii monitoringa okruzhayushey sredy, potentsial'no opasnykh yavleniy i ob'ektov.* M.: Azbuka–2000, 2006. T. 2. Vyp. 3. P. 9–15.
- Batalin A.M.* Plotnost' [Density] // *Gidrologicheskii spravochnik morey SSSR.* L.: Gidrometeoizdat, 1958. T. 8. Vyp. 2. P. 244–263. (In Russian).
- Choi Y.J., Yoon J.-H.* Structure and seasonal variability of the deep mean circulation of the East Sea (Sea of Japan) // *J. Oceanogr.* 2010. V. 66. Is. 3. P. 349–361.
- Danchenkov M.A., Riser S.C., Yoon J.-H.* Glubinnyye techeniya tsentralnoy chasti Yaponskogo morya [Deep currents of the Central Sea of Japan] // *Podvodnyye tekhnologii i mir okeana.* 2005. № 3. P. 58–63. (In Russian).
- Darnitskiy V.B.* Okeanologicheskie protsessy vblizi podvodnykh gor i khrebtov otkrytogo okeana [Oceanological processes near seamounts and open ocean ridges] // *Vladivostok: TINRO-Center.* 2010. 199 p. (In Russian).
- Goncharenko I.A., Federyakov V.G., Lazaryuk A.Yu., Ponomarev V.I.* Tematicheskaya obrabotka dannykh AVHRR na primere izucheniya pribrezhnogo apvellinga [Thematic processing of AVHRR data using the example of studying coastal upwelling] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 1993. № 2. P. 97–108. (In Russian).
- Hogan P.J., Hurlburt H.E.* Impact of upper ocean–topographical coupling and isopycnal out-cropping in Japan/East Sea models with 1/8° to 1/64° resolution // *J. Phys. Oceanogr.* 2000. V. 30. № 10. P. 2535–2561.
- Istoshin Yu.V.* Temperatura vody Yaponskogo morya i vozmozhnost' ee prognoza [Temperature of the water of the Sea of Japan and the possibility of its forecast] // *Trudy okeanograficheskoy komissii AN SSSR.* 1960. T. 7. P. 52–97. (In Russian).
- Kang S.K., Seung Y.H., Park J.J., Park J.-H., Lee J.H., Kim E.J., Kim Y.H., Suk M.-S.* Seasonal variability in mid-depth gyral circulation patterns in the central East/Japan Sea as revealed by long-term Argo data // *J. Phys. Oceanogr.* 2000. V. 46. P. 937–946. DOI: 10.1175/JPO-D-15-0157.1.
- Kozlov V.F., Darnitskiy V.B.* Topograficheskii tsyklogenez v okeane [Topographic cyclogenesis in the ocean] // *Trudy DVNII.* 1981. Vyp. 83. P. 85–100. (In Russian).
- Leonov A.K.* Vodnyye massy Yaponskogo morya [Water masses of the Sea of Japan] // *Meteorologiya i gidrologiya.* 1948. № 6. P. 61–78. (In Russian).
- Leonov A.K.* Yaponskoye more [The Japan Sea] // *Regional'naya oceanografiya. Chast' 1.* L.: Gidrometeoizdat. 1960. P. 291–463. (In Russian).
- Lobanov V.B., Ponomarev V.I., Salyuk A.N., Tischenko P.Ya., Tully L.D.* Struktura i dinamika sinopticheskikh vikhrey severnoy chasti Yaponskogo morya [Structure and dynamics of synoptic eddies in the northern part of the Sea of Japan] // *Dal'nevostochnyye morya Rossii. Kn. 1. Okeanologicheskyye issledovaniya / Gl. red. V.A. Akulichev.* M.: Nauka. 2007. P. 450–473. (In Russian).
- Lobanov V.B., Sergeev A.F., Navrotsky V.V., Voronin A.A., Gorin I.I., Pavlova E.P.* Instrumental'nyye nablyudeniya kas-

- kadinga na sklone zaliva Petra Velikogo Yaponskogo morya [Instrumental observations of cascading on the slope of Peter the Great Bay, Sea of Japan] // Trudy konferentsii: "Sovremennyye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovaniy (MCOI-2019)". T. 1. M.: IO RAN, 2019. P. 104–108. (In Russian).
- Lobanov V.B., Sergeev A.F., Shlyk N.V., Voronin A.A., Gorin I.I., Tsoy V., Goryachev V.A., Kraynikov G.A., Zverev S.A., Rudykh Ya.N., Mar'ina E.N., Prushkovskaya I.A., Luk'yanova N.B., Telichko A.S. Sinopticheskaya dinamika vod severo-zapadnoy chasti Yaponskogo morya v osenniy period (po rezul'tatam 57-go reysa NIS "Akademik Oparin" [Synoptic dynamics of the waters of the northwestern part of the Sea of Japan in the autumn period (based on the results of the 57th cruise of the R/V "Akademik Oparin"] // Fizika geosfer. Dvennadtsatyy Vserossiyskiy simpozium, 6–10 sentyabrya 2021 g. Vladivostok, Rossiya, 2021. P. 71–73. (In Russian). Elektronnyy resurs. Rezhim dostupa: <https://www.poi.dvo.ru/conf/phg2021>.
- Metodicheskiye ukazaniya po kompleksnomu ispol'zovaniyu sputnikovoy informatsii dlya izucheniya morey // L.: Gidrometeoizdat. 1987. 144 p.
- Mokievskaya V.V. Khimicheskaya kharakteristika vodnykh mass [Chemical characteristics of water masses] // Osnovnyye cherty geologii i gidrologii Yaponskogo morya / Ot. red. V.N. Stepanov. M.: Izd-vo AN SSSR. 1961. P. 122–131. (In Russian).
- Nikitin A.A., Lobanov V.B., Danchenkov M.A. Vozmozhnyye puti perenosa teplykh subtropicheskikh vod v rayon Dal'nevostochnogo morskogo zapovednika [Possible ways of transfer of warm subtropical waters to the region of the Far Eastern Marine Reserve] // Izvestiya TINRO. 2002. T. 131. P. 41–53. (In Russian).
- Nikitin A.A., Yurasov G.I. Sinopticheskiye vikhri Yaponskogo morya po sputnikovym dannym [Synoptic eddies of Japan Sea based on the satellite data] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2008. № 5. P. 42–57. (In Russian).
- Nikitin A.A., Danchenkov M.A., Lobanov V.B., Yurasov G.I. Novaya shema poverhnostnoy tsirkulyatsii Yaponskogo morya s uchetom sinopticheskikh vikhrey // Izvestiya TINRO. 2009. T. 157. P. 158–167. (In Russian).
- Nikitin A.A., Yurasov G.I., Vanin N.S. Sputnikovyye nablyudeniya sinopticheskikh vikhrey i geostroficheskaya tsirkulyatsiya vod Yaponskogo morya [Satellite observations of synoptic eddies and geostrophic circulation of waters of the Japan Sea] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2012. № 2. P. 28–40. (In Russian).
- Nikitin A.A., Yurasov G.I. Poverhnostnye termicheskiye fronty v Yaponskom more // Izvestiya TINRO. 2017. T. 148. P. 170–192. (In Russian).
- Nikitin A.A., Dyakov B.S., Kapshiter A.V. Primorskoye techeniye na standartnykh razrezakh i sputnikovyykh izobrazheniyakh Yaponskogo morya [Primorsky current on standard sections and satellite images of the Sea of Japan] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2020. № 1. P. 31–43. (In Russian).
- Panfilova S.G. Temperatura vod [Water temperature] // Osnovnyye cherty geologii i gidrologii Yaponskogo morya / Ot. red. V.N. Stepanov. M.: Izd-vo AN SSSR. 1961. P. 155–169. (In Russian).
- Pokudov V.V., Man'ko A.N., Khlusov A.N. Osobennosti gidrologicheskogo rezhima vod Yaponskogo morya v zimniy period [Features of the hydrological regime of the waters of the Sea of Japan in winter] // Trudy DVNIGMI. 1976. Vyp. 60. P. 74–115. (In Russian).
- Pokudov V.V., Tunegolovets V.P. Novaya skhema techeniy Yaponskogo morya dlya zimnego perioda [New scheme of currents in the Sea of Japan for the winter period] // Trudy DVNII. 1975. Vyp. 50. P. 24–32. (In Russian).
- Prants S.V., Uleysky M.Yu., Budyansky M.V. Lagranzhev analiz putey perenosa subtropicheskikh vod k beregam Primor'ya [Lagrangian analysis of the transport pathways of subtropical waters to the shores of Primorye] // DAN. 2018. T. 481. № 6. P. 666–670. (In Russian).
- Rekomendatsii po ispol'zovaniyu sputnikovyykh IK snimkov v okeanologicheskikh issledovaniyakh // Vladivostok. TINRO. 1984. 43 p.
- Senjyu T., Shin H.-R., Yoon J.-H., Nagano Z., An H.-S., Byun S.-K., Lee C.-K. Deep flow field in the Japan/East Sea as deduced from direct current measurements // Deep Sea Res. II. 2005. V. 52. No. 11–13. P. 1726–1741.
- Sergeev A.F., Matveev V.I., Lobanov V.B., Gorin I.I., Kotenko B.M., Starikov A.G. Izmenchivost' pridonnoy temperatury vody v pribrezhnoy zone Primor'ya v 2003–2007 gg. // Tezisy dokladov Tret'ey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Morskiye pribrezhnye ekosistemy. Vodorosli, bespozvonochye i produkty ih pererabotki". Vladivostok. TINRO-Tsent. 2008. P. 207–208.
- Schlitzer R. Ocean Data View. 2019. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://odv.awi.de>.
- Stepanov V.N. Obschaya kharakteristika gidrologii Yaponskogo morya [General characteristics of the hydrology of the Sea of Japan] // Osnovnyye cherty geologii i gidrologii Yaponskogo morya / Ot. red. V.N. Stepanov. M.: Izd-vo AN SSSR. 1961. P. 102–107. (In Russian).
- Takematsu M., Nagano Z., Ostrovskii A.G., Kim K., Volkov Y. Direct Measurements of Deep Currents in the Northern Japan Sea // Journal of Oceanography. 1999. V. 55. No. 2. P. 207–216.
- Takematsu M., Ostrovskii A.G., Nagano Z. Observations of Eddies in the Japan Basin Interior // Journal of Oceanography. 1999. V. 55. No. 2. P. 237–246.
- Talley L.D., Lobanov V., Ponomarev V., Salyuk A., Tishchenko P., Zhabin I., Riser S. Deep convection and brine rejection in the Japan Sea // Geophys. Res. Lett. 2003. Vol. 30. No. 4. P. 1–4. DOI: 10.1029/20002GL016451.
- Talley L.D., Tishchenko P., Luchin V., Nedashkovskiy A., Sagaev S., Kang D.-J., Warner M. and Min D.-H. Atlas of Japan (East) Sea hydrographic properties in summer, 1999: Supplementary material // Progress in Oceanography. 2004. V. 61. Is. 2–4. P. 277–348. DOI:10.1016/j.pocan.2004.06.011.
- Taranova S.N., Yurasov G.I., Zhabin I.A. Sezonnaya izmenchivost' poverkhnostnoy tsirkulyatsii vod severnoy chasti Yaponskogo morya po dannym dreyfuyuschikh buyev [Seasonal variability of surface water circulation in the northern part of the Sea of Japan according to drifting buoy data] // Izvestiya TINRO. 2018. T. 192. P. 177–183. (In Russian).
- Trusenkov O.O. Sezonnyye i mezhgodovyye izmeneniya tsirkulyatsii vod Yaponskogo morya [Seasonal and interannual changes in water circulation in the Sea of Japan] // Dal'nevostochnyye morya Rossii. Kn. 1. Okeanologicheskyye issledovaniya / Gl. red. V.A. Akulichev. M.: Nauka. 2007. P. 280–306. (In Russian).

- Trusenkova O.O.* Modelirovaniye glubinnykh techeniy Yaponskogo morya: vzaimosvyaz' s techeniyami v piknokline [Modeling of deep currents in the Sea of Japan: relationship with currents in the pycnocline] // *Izvestiya TINRO*. 2018. T. 192. P. 184–201. (In Russian).
- Trusenkova O.O., Stanichnyy S.V., Ratner Yu.B.* Osnovnye mody izmenchivosti i tipovye polya vetra nad Yaponskim morem i prilgayuschimi rayonami sushy [Main modes of variability and typical wind fields over the Sea of Japan and adjacent land areas] // *Izvestiya RAS. FAO*. 2007. T. 43. № 5. P. 688–703. (In Russian).
- Vanin N.S.* Anomal'nye termicheskie usloviya severo-zapadnoy chasti Yaponskogo morya osen'yu 2003 g. [Anomalous thermal conditions in the northwestern part of the Sea of Japan in the fall of 2003] // *Izvestiya TINRO*. 2004. T. 138. P. 345–354. (In Russian).
- Vasil'ev A.S., Makashin V.P.* Ventilyatsiya vod Yaponskogo morya v zimniy period [Ventilation of waters of the Sea of Japan in winter] // *Meteorologiya i gidrologiya*. 1991. № 2. P. 71–79. (In Russian).
- Yarichin V.G.* Nekotoryye osobennosti gorizontal'nogo dvizheniya vod v Yaponskom more k severu ot 40° s. sh. [Some features of horizontal water movement in the Sea of Japan north of 40° N] // *Trudy DVNII*. 1982. Vyp. 96. P. 111–121. (In Russian).
- Yarichin V.G., Pokudov V.V.* Formirovaniye strukturnykh osobennostey gidrofizicheskikh poley i techeniy v severnoy glubokovodnoy chasti Yaponskogo morya [Formation of structural features hydrophysical fields and currents in the northern deep-water part of the Sea of Japan] // *Trudy DVNII*. 1982. Vyp. 96. P. 86–95. (In Russian).
- Yoon J.-H., Abe K., Ogata T., Wakamatsu Y.* The effects of wind-stress curl on the Japan/East Sea Circulation // *Deep Sea Res. II*. 2005. V. 52. No. 11–13. P. 1827–1844.
- Yurasov G.I., Yarichin V.G.* Teleniya Yaponskogo morya [Currents of the Sea of Japan] // *Vladivostok. Izd-vo DVO AN SSSR*. 1991. 174 p. (In Russian).
- Yurasov G.I.* Osobennosti struktury i dinamiki vod severnoy chasti Yaponskogo morya [Features of the structure and dynamics of waters in the northern part of the Sea of Japan] // *Tikhookeanskiy okeanologicheskiy institut DVNTS AN SSSR*. Vladivostok. 1995. 28 p. Dep. VINITI 01/27/95. № 468-B95 (In Russian).
- Yurasov G.I., Vanin N.S., Rudykh N.I.* Klimaticheskiye kharakteristiki techeniy Yaponskogo morya po dannym raschetov dinamicheskimi metodom [Climatic characteristics of currents in the Sea of Japan according to calculations using the dynamic method] // *Izvestiya TINRO*. 2011. T. 164. P. 340–347. (In Russian).
- Zhabin I.A., Gramm-Osipova O.L., Yurasov G.I.* Vetrovoy apvelling u severo-zapadnogo poberezh'ya Yaponskogo morya [Wind upwelling off the northwestern coast of the Sea of Japan] // *Meteorologiya i gidrologiya*. 1993. № 10. P. 82–86. (In Russian).
- Zyryanov V.N.* Topograficheskie vikhri v dinamike morskikh techeniy [Topographic eddies in the dynamics of sea currents] // *M.: IVP RAS*. 1995. 240 p. (In Russian).