

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ВЛИЯНИЕ ТАЙФУНА “ХИННАМНОР” (СЕНТЯБРЬ 2022 г.) НА ПРИБРЕЖНЫЙ АПВЕЛЛИНГ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2024 г. И. А. Жабин¹ *, Е. В. Дмитриева¹, В. А. Дубина¹, С. Н. Таранова¹

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

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

Поступила в редакцию 23.01.2024 г.

Летом 2022 года у северо-западного побережья Японского моря наблюдался хорошо выраженный ветровой апвеллинг. Результаты расчета индекса апвеллинга показали, что прибрежный апвеллинг был вызван направленным от берега экмановским переносом. Трансфронтальный обмен в зоне апвеллинга определялся мезомасштабными вихрями и струйными течениями. Анализ данных спутниковых и метеорологических наблюдений позволил рассмотреть влияние тайфуна Хиннамнор (сентябрь 2022 г.) на зону прибрежного апвеллинга в северо-западной части Японского моря. Под влиянием тайфуна произошел отрыв вод апвеллинга от побережья. Адвективный перенос холодных вод в глубоководную часть моря определялся взаимодействием вод зоны апвеллинга с антициклоническим меандром Цусимского течения. После прохождения тайфуна наблюдалось резкое понижение температуры в струйных течениях системы апвеллинга. Усиление ветра привело к формированию новой зоны апвеллинга на западном шельфе Татарского пролива. Как следствие, под влиянием прибрежного апвеллинга и тайфуна в сентябре 2022 г. в северной части Японского моря наблюдались отрицательные аномалии поверхностной температуры.

Ключевые слова: Японское море, апвеллинг, Приморское течение, мезомасштабные вихри, струйные течения, тайфун Хиннамнор, спутниковые данные, метеорологические наблюдения

DOI: 10.31857/S0205961424060018, EDN: RQYYZG

ВВЕДЕНИЕ

Прибрежный апвеллинг можно определить как выход более холодных глубинных вод в верхний слой моря под действием баланса сил между напряжением ветра, эффектом Кориолиса и градиентом давления. Экмановский апвеллинг вызывается вдольбереговым ветром, в северном полушарии берег расположен слева от направления действия ветра. В этом случае экмановская динамика вызывает дивергенцию поверхностных течений у побережья и компенсационный подъем глубинных вод. Подъем вод обычно происходит с глубин 100–300 м и занимает по времени от ~ одного дня до нескольких суток в зависимости от продолжительности действия ветра (Боуден, 1988). Более холодные воды апвеллинга служат источником биогенных элементов для поверхностных вод и отличаются высокой биологической продуктивностью.

В осенний период прибрежный ветровой апвеллинг наблюдается у северо-западного побережья Японского моря (Жабин и др., 2017). На апвеллинг у побережья Приморского края (приморский

апвеллинг) оказывает влияние сезонная изменчивость ветровых условий, связанная с муссонным характером атмосферной циркуляции. Апвеллинг хорошо выражен в осенний период (сентябрь–октябрь), когда у Южного Приморья увеличивается повторяемость сильных ветров западного и северо-западного направлений, благоприятных для развития апвеллинга. В умеренных широтах апвеллинг генерируется в процессе изменчивости атмосферной циркуляции на синоптическом масштабе. У северо-западного побережья Японского моря осенний ветровой апвеллинг в основном связан с выходом атмосферных циклонов в прибрежные районы в период перехода от летнего к зимнему типу атмосферной циркуляции. Интенсивность и положение зоны апвеллинга могут изменяться в зависимости от количества и траекторий движения атмосферных циклонов. Существенное влияние на процесс формирования апвеллинга оказывают морфология шельфа и стратификация прибрежных вод. Зона прибрежного апвеллинга в северо-западной части моря связана с Приморским течением. Приморское течение хорошо выражено у восточ-

ного побережья Приморья. У Южного Приморья течение поворачивает на запад и следует по направлению к зал. Петра Великого. Высокоскоростное ядро Приморского течения расположено над материковым склоном вблизи внешней кромки шельфа. Горизонтальный поперечный масштаб течения изменяется от 20 до 60 км. (Никитин и др., 2020; Nikitin et al., 2023). Зона прибрежного апвеллинга в северо-западной части Японского моря расположена между побережьем Приморья и Приморским течением. В осенний период отмечено усиление мезомасштабной вихревой активности в зоне Приморского течения (Гинзбург и др., 1998; Nikitin et al., 2023).

В сентябре 2022 г. на акваторию Японского моря вышел тайфун Хиннамнор (Hinnamnog). Данные о тайфуне доступны на специализированном электронном ресурсе японского НИИ (National Institute of Informatics): <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/summary/wnp/s/202211.html.en>. Тайфун Хиннамнор впервые был зарегистрирован 28.08.2022 как тропический шторм (рис. 1 а, здесь и далее время в UTC). Тропический циклон достиг максимальной стадии развития 30.08.2022, превратившись в супертайфун пятой категории. Минимальное давление в центре тайфуна составило 920 Па, максимальная скорость ветра достигала значений 54 м/с. Хиннамнор вышел в южную часть Японского моря в категория “тайфун” 06.09.2022 в 00:00. В центральной части моря тайфун определялся как тропический шторм. При подходе к восточному побережью Приморья (06.09.2022 12:00) тропический шторм перешел в категорию циклона умеренных широт. После пересечения береговой линии циклон продолжил движение над сушей по направлению к Охотскому морю. Циклон окончательно разрушился над Охотским морем 9.09.2022. Общая продолжительность существования тайфуна Хиннамнор составила 9,25 суток при средней скорости движения 25,5 км/ч.

Тайфуны оказывают значительное влияние на структуру и динамику вод океана. Комплексные теоретические и экспериментальные исследования влияния тайфунов на поверхностный слой было выполнено советскими учеными (Тропические циклоны..., 1989). В этот период была создана советско-вьетнамская лаборатория по тропической метеорологии, к основным научным задачам которой относились исследования тропических циклонов. В рамках совместной работы была разработана модель эволюции верхнего слоя океана под влиянием тропических циклонов, в которой учитывался вклад апвеллинга и ветрового перемешивания. Было установлено, что в Южно-Китайском море основной вклад в охлаждение поверхностного слоя вносит апвеллинг и турбулентное вовлечение. Эк-

периментальные судовые исследования, выполненные в Южно-Китайском море, показали, что прибрежный апвеллинг у берегов Вьетнама можно рассматривать как своеобразный естественный барьер, защищающий прибрежные районы южного Вьетнама от наиболее разрушительных последствий действия тайфунов.

Современные методы и комплексные системы мониторинга тропических циклонов, включающие технологии формирования баз данных и алгоритмы обработки результатов космических и наземных наблюдений подробно рассмотрены в работе (Бондур, Крапивин, 2014). В этой работе предлагаются различные методы и подходы, основанные на анализе результатов дистанционного зондирования и численного моделирования процессов тропического циклогенеза в системе океан–атмосфера.

Понижение температуры поверхности моря (ТПМ) в зонах прибрежного апвеллинга после прохождения тайфунов наблюдалось в Южно-Китайском море, вблизи о. Тайвань и в Восточно-Китайском море (Kuo et al., 2020; Li et al., 2021; Che et al., 2023). В отдельных случаях ТПМ не изменялась или отмечалось повышение температуры (Xie et al., 2017). Степень влияния тропических циклонов на апвеллинг зависит от интенсивности тайфуна и от угла подхода барического образования к побережью. В отдельных случаях при воздействии тропических циклонов на прибрежный апвеллинг отмечались дополнительные эффекты: генерация внутренних волн (Hong et al., 2022) и прибрежных захваченных волн (Filonov et al., 2021). Влияние тайфунов на прибрежный апвеллинг в Южно-Китайском море может приводить к увеличению концентраций биогенных элементов и хлорофилла (Che et al., 2021; Zheng et al., 2021). Это оказывает прямое влияние на биологическую продуктивность и состояние морских экосистем шельфовой зоны.

В Японском море тайфуны могут вызывать интенсивный прибрежный апвеллинг у побережья Южной Кореи, который приводит к аномально низким значениям ТПМ в этом районе (Park and Kim, 2010). При взаимодействии тайфунов с фронтом Цусимского течения и мезомасштабными вихрями наблюдалось усиление генерации внутренних инерционных волн, которые принимают участие в диссипации кинетической энергии тропических циклонов в Японском море (Kawaguchiet al., 2023).

Тайфун Хиннамнор оказал значительное влияние на зону прибрежного апвеллинга, расположенную у побережья Приморья и в Татарском проливе. Исходя из этого была определена основная цель работы – на основе анализа спутниковой информации и метеорологических данных рассмотреть

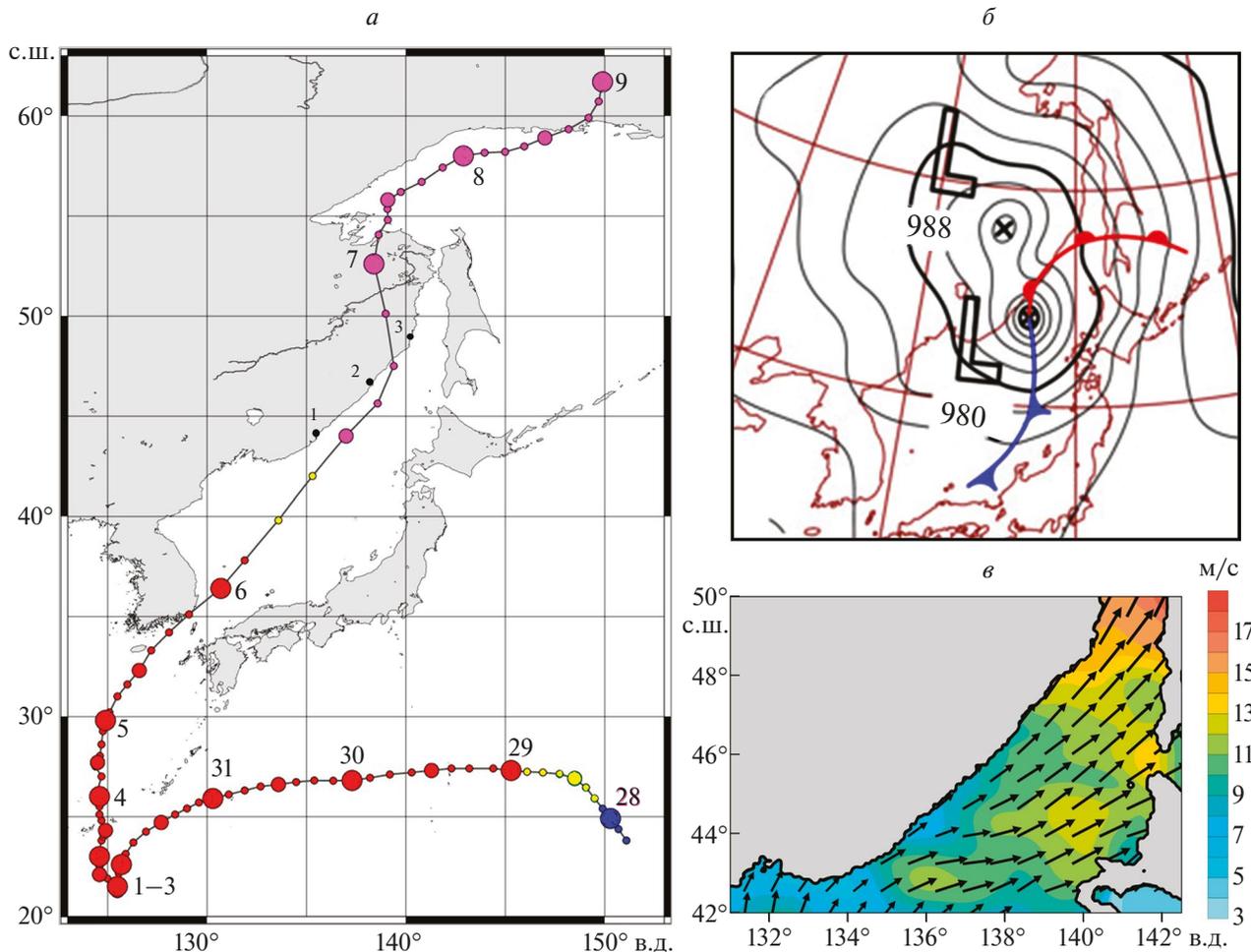


Рис. 1. Траектория движения тайфуна Хиннамнор (а), фрагмент карты приземного синоптического анализа на 12:00 06.09.2022 (б) и распределение направления и скорости приводного ветра в северной части Японского моря по данным NCEI на 12:00 07.09.2022 (в). На рис. 1 а цветом выделены стадии развития тайфуна: синий – тропическая депрессия; желтый – тропический шторм; красный – тайфун; фиолетовый – циклон умеренных широт. Цифры у больших кружков на траектории движения тайфуна обозначают даты (00:00) положения центра тайфуна. Черными точками на побережье показаны береговые гидрометеорологические станции: 1 – Ольга; 2 – Сосуново; 3 – Советская гавань.

влияние тайфуна Хиннамнор на термическую структуру вод северо-западной части Японского моря.

ДАННЫЕ И МЕТОД РАСЧЕТА ИНДЕКСА АПВЕЛЛИНГА

Данные о скорости и направлении ветра были получены из Национального центра информации об окружающей среде Национального центра океанических и атмосферных исследований США (NOAA's National Centers for Environmental Information (NCEI)). Объединенный массив спутниковых данных о приводном ветре имеет пространственное разрешение $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, временной шаг составляет 6 часов. Точность измерения на-

правления и скорости ветра составляет 20° и 2 м/с. При создании этого массива использовались методы объективного анализа данных спутниковых наблюдений (Zhang et al., 2006). Данные доступны на портале NOAA CoastWatch (<https://coastwatch.noaa.gov/erddap/griddap/noaacwBlendedWinds6hr.graph>). Спутниковые данные о приводном ветре анализировались совместно с результатами метеорологических наблюдений на прибрежных гидрометеостанциях (ГМС) Ольга, Сосуново и Советская гавань (<http://www.pogodaiklimat.ru>), их положение показано на рис. 1 а.

Для исследования пространственного распределения ТПМ в работе использовались осредненные за сутки и объединенные в один массив данные спектро радиометров AVHRR (спутники серии

NOAA и MetOp) и VIIRS (спутники Suomi NPP и NOAA-20). Пространственное разрешение массива составляет 0.02° . Данные доступны на портале NOAA (<https://coastwatch.noaa.gov/erddap/griddap/oaacwLEOACSPoSSTL3SCDaily.graph>).

Данные о поверхностных суммарных геострофических и ветровых течениях были получены из NASA (<https://urs.earthdata.nasa.gov>). Массив данных о течениях имеет пространственное разрешение 0.25° , временное разрешение 1 сутки.

Для расчета аномалий ТПМ в северной части Японского моря в сентябре 2022 г. использовался среднемесячный массив данных оптимально

интерполированной поверхностной температуры с пространственным разрешением 0.25° (Physical Sciences Laboratory NOAA, <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.html>). Для расчета средних значений поверхностной температуры в северной части Японского моря был выбран полный период постоянных глобальных спутниковых наблюдений ТПМ NOAA (1982–2023).

В качестве дополнительной информации использовались спутниковое изображение инфракрасного (ИК) диапазона, полученное со спутника Aqua (MODIS) и данные о характеристиках поля ветра (скаттерометр ASCAT, портал NOAA

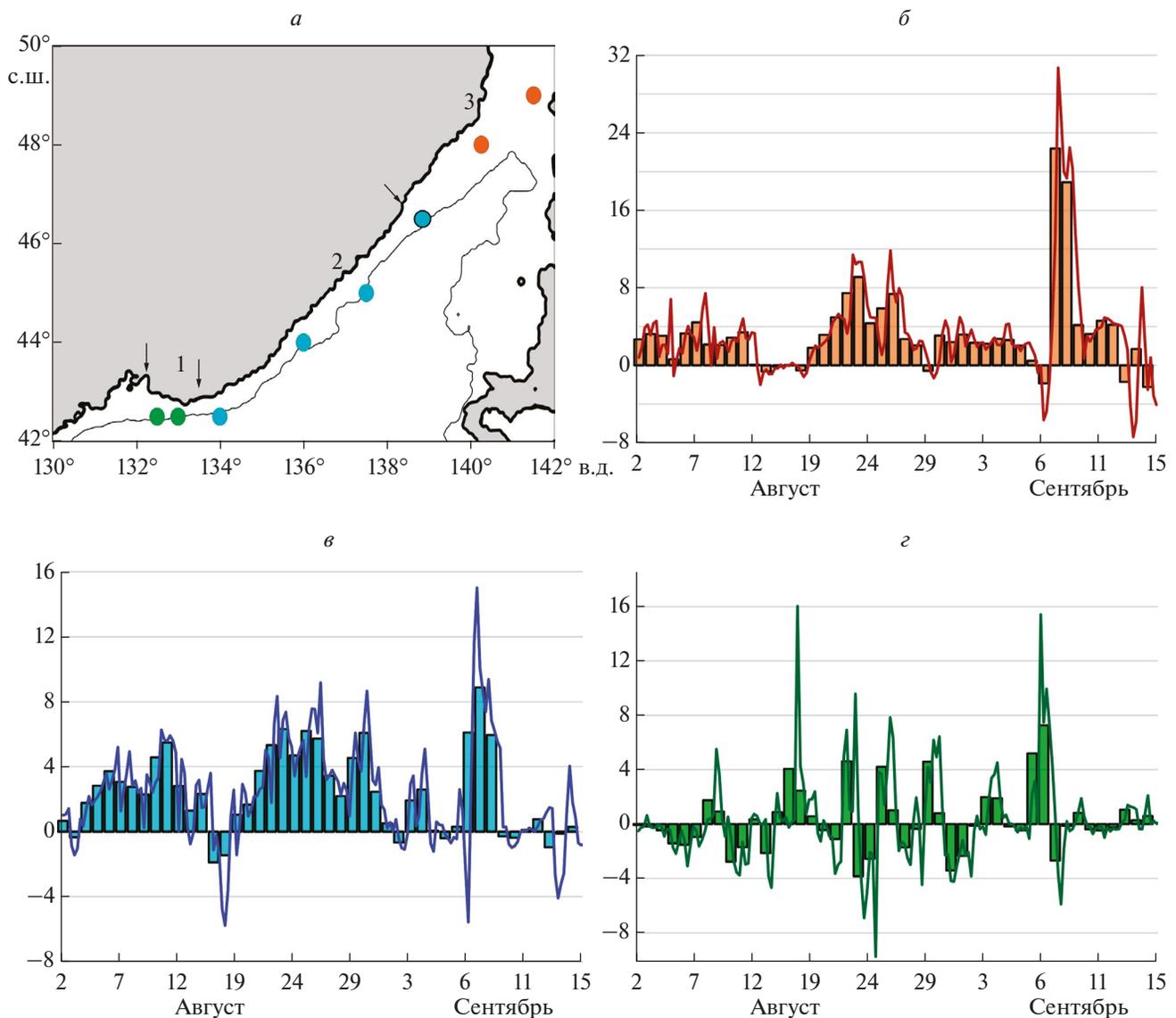


Рис. 2. Положение точек, для которых рассчитывался индекс апвеллинга (а) и результаты расчета ИА для Татарского пролива (б), восточного (в) и южного (г) побережья Приморья. Сплошными тонкими линиями показаны 6-часовые значения ИА, столбики соответствуют среднесуточным значениям индекса. Цвет точек на карте соответствует цвету на графиках. Стрелками (а) обозначены границы районов, для которых рассчитывался средний ИА: 1 – Южное Приморье; 2 – Восточное Приморье; 3 – побережье Татарского пролива.

CoastWatch (<https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap/erdQMwind1day.graph>). Данные MODIS получены из системы NASA LANCE (<https://lance.modaps.eosdis.nasa.gov>).

Для исследования изменчивости апвеллинга можно использовать ветровой индекс апвеллинга, позволяющий получить количественные оценки направленного от берега экмановского переноса вод в поверхностном слое трения (Bakun, 1973, 1990). Индексы апвеллинга экмановского типа рассчитываются по полю ветра в прибрежных районах океана. Для характеристики ветровых условий в зонах апвеллинга используются данные, полученные при помощи спутниковых скаттерометров. В этом случае индекс апвеллинга отражает короткопериодную изменчивость поля ветра (Gonzalez-Nuevo et al., 2014).

Для прибрежных районов северо-западной части Японского моря уравнение для расчета ветрового индекса апвеллинга можно представить в следующем виде:

$$IA = -\sin(\alpha - \pi/2) Q_x + \cos(\alpha - \pi/2) Q_y,$$

где α – угол между соответствующей параллелью и прямой, аппроксимирующей среднюю береговую линию, Q_x и Q_y – значения зональной и меридиональной составляющих ветрового переноса. В этом случае $Q_x = \tau_y / \rho f$, $Q_y = -\tau_x / \rho f$, где τ_x и τ_y – значения зональной и меридиональной составляющих касательного напряжения ветра, ρ – плотность морской воды (1025 кг/м^3), f – параметр Кориолиса. Касательное напряжение ветра рассчитывались по уравнениям, предложенным в работе (Large, Pond, 1981). Расчеты ИА были выполнены для точек, в которых в августе–сентябре 2022 г. на картах распределения ТПМ в прибрежных районах наблюдались холодные воды апвеллинга. Положение точек, для которых рассчитывалось значение этого индекса, показано на рис. 2 а. Результаты расчетов ИА осреднялись в пределах трех основных зон апвеллинга: Южного Приморья, Восточного Приморья и Татарского пролива. При выделении районов учитывалась ориентация береговой линии. Для Южного Приморья отчетный угол α составлял 180° , для Восточного Приморья – 315° , для Татарского пролива – 330° . Для получения размерности, соответствующей скорости объемного переноса вод ИА нормировался на единицу длины береговой линии ($\text{м}^3/\text{с}/10 \text{ м}$ береговой линии). Положительные значения ИА соответствуют направленному от берега ветровому переносу, который вызывает прибрежный апвеллинг. Отрицательные значения ИА соответствуют даунвеллингу (опусканию вод). В общем случае ИА позволяет определить временные интервалы с благоприятными для развития

апвеллинга ветровыми условиями и количественно оценить относительную интенсивность этого процесса.

ВЕТРОВОЙ АПВЕЛЛИНГ У СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ЯПОНСКОГО МОРЯ В АВГУСТЕ–СЕНТЯБРЕ 2022 г.

В летне-осенний период 2022 г. у северо-западного побережья Японского моря наблюдался хорошо выраженный прибрежный ветровой апвеллинг. У западного побережья Татарского пролива ($48\text{--}50^\circ \text{ с.ш.}$) апвеллинг в поле ТПМ был впервые зарегистрирован 11.08.2022 (рисунок здесь не приводится). В последующий период времени за счет радиационного прогрева происходило сглаживание термических контрастов между зоной апвеллинга и водами Татарского пролива. Результаты расчета ИА (рис. 2 б) показывают, что благоприятные ветровые условия для развития апвеллинга в этом районе наблюдались в период с 2 по 12 августа. Первые признаки апвеллинга у восточного побережья Приморья ($43\text{--}48^\circ \text{ с.ш.}$) появились в поле ТПМ 23 августа. Обычно в летний период апвеллинг в этом районе не наблюдается. По среднемноголетним спутниковым данным о ветре осенний апвеллинг развивается в сентябре–октябре (Жабин и др., 2017). Результаты расчета ИА показывают, что относительно высокие положительные значения индекса апвеллинга в этом районе наблюдались с 20 по 31 августа (рис. 2 в). В течении этого периода времени у Восточного Приморья сформировалась основная зона прибрежного апвеллинга (рис. 3). Наиболее благоприятные для развития апвеллинга ветровые условия были связаны с континентальным атмосферным циклоном, который определял синоптическую ситуацию у Восточного Приморья 21–24 августа. У берегов Южного Приморья в течении августа наблюдались короткопериодные события апвеллинга (рис. 2 г), которые вызвали понижение температуры воды у побережья.

На рис. 3 показано распределение ТПМ в северной части Японского моря, полученное 28 августа. На рисунке видно, что в результате благоприятных ветровых условий у всего северо-западного побережья Японского моря наблюдались холодные воды прибрежного апвеллинга. В пределах этой зоны отчетливо выделялись так называемые ядра апвеллинга с минимальными значениями поверхностной температуры. Такие ядра обычно связаны с районами, в которых меняется ориентация береговой линии и ширина шельфовой зоны. В зоне апвеллинга можно условно выделить 5 ядер апвеллинга, два из которых были расположены на более широких участках шельфовой зоны Приморья

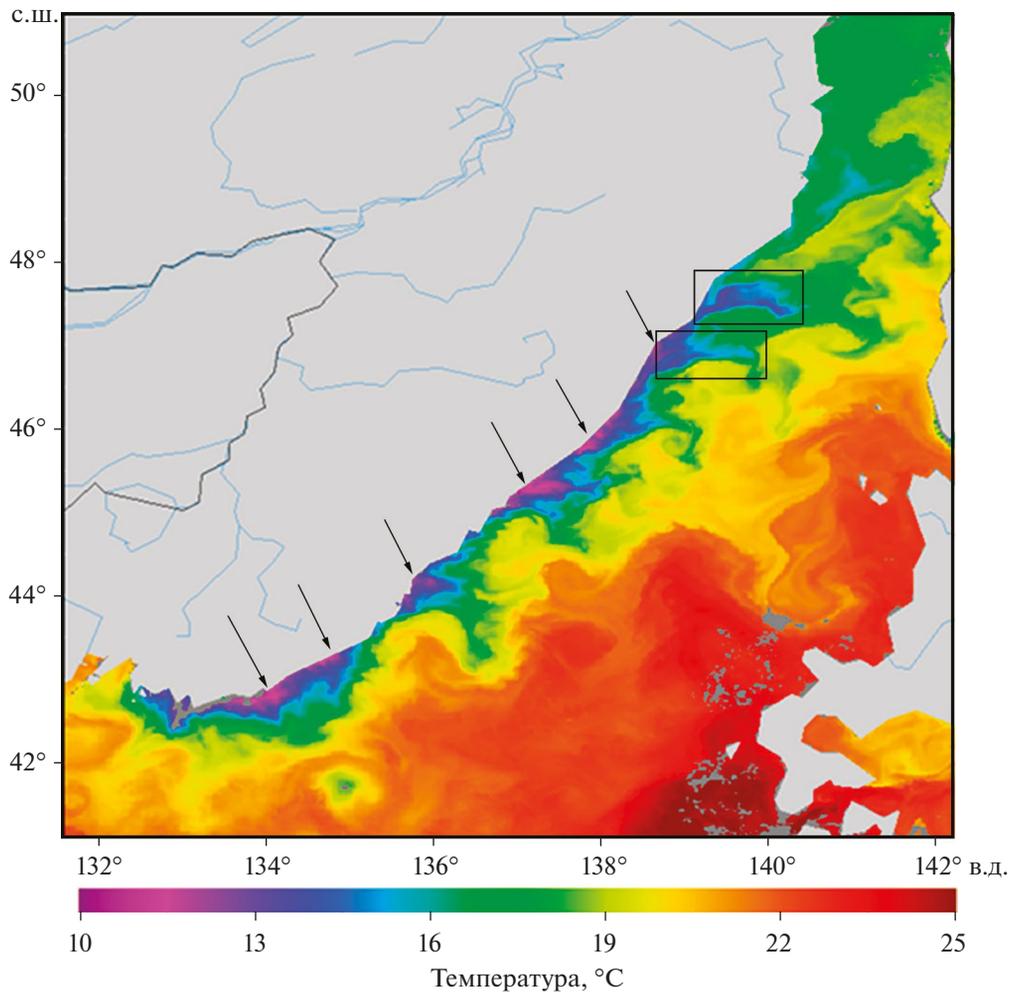


Рис. 3. Распределение поверхностной температуры в северной части Японского моря 28.08.2022 (данные GHRSSST и NOAA). Стрелками показано положение ядер апвеллинга, прямоугольники показывают положение поперечных струйных течений, расположенных на 46.5° и 47.5° с.ш.

(42.75° и 45.20° с.ш.). Минимальные значения температуры в этих ядрах составляли ~11° С, перепад температуры по сравнению с окружающими водами достигал значений 9–10° С.

Усиление прибрежного апвеллинга может приводит к формированию поперечных струйных течений. Эти течения проявляются как протяженные (100–200 км) и узкие (10–50 км) полосы холодной воды, которые распространяются от побережья в сторону открытого моря. Вертикальный масштаб таких струй составляет около 100 м, скорость распространения имеет порядок 1 м/с. В общем случае трансфронтальный обмен свойствами между водами апвеллинга и глубоководными районами определяется как совместный результат действия двух механизмов: отклика на воздействие касательного напряжения ветра, которое приводит к развитию прибрежного апвеллинга и адвективного переноса холодных вод струйными течениями в направле-

нии от побережья, который модулируется мезомасштабной вихревой активностью (Moore and Robinson, 1984; Strub et al, 1991).

Признаки формирования апвеллинговых струй проявляются в южной части Татарского пролива (рис. 3). Продольный масштаб струйного течения, расположенного на ~47.5° с.ш., составлял ~75 км. Длина второй струи, вытянутой вдоль 46.5° с.ш., ~100 км. Поперечный масштаб этих двух струйных течений уменьшался от 25 км в районе основного фронта апвеллинга до 10 км на отдаленных от берега участках струйных вторжений.

В процессе формирования и распространения поперечные струи перемешиваются с окружающими водами и меняют свои характеристики. Система поперечных струйных течений в северной части Японского моря отчетливо проявляется на спутниковом ИК-изображении, полученном 3.09.2022 (MODIS Aqua; рис. 4). На рисунке видно, что се-

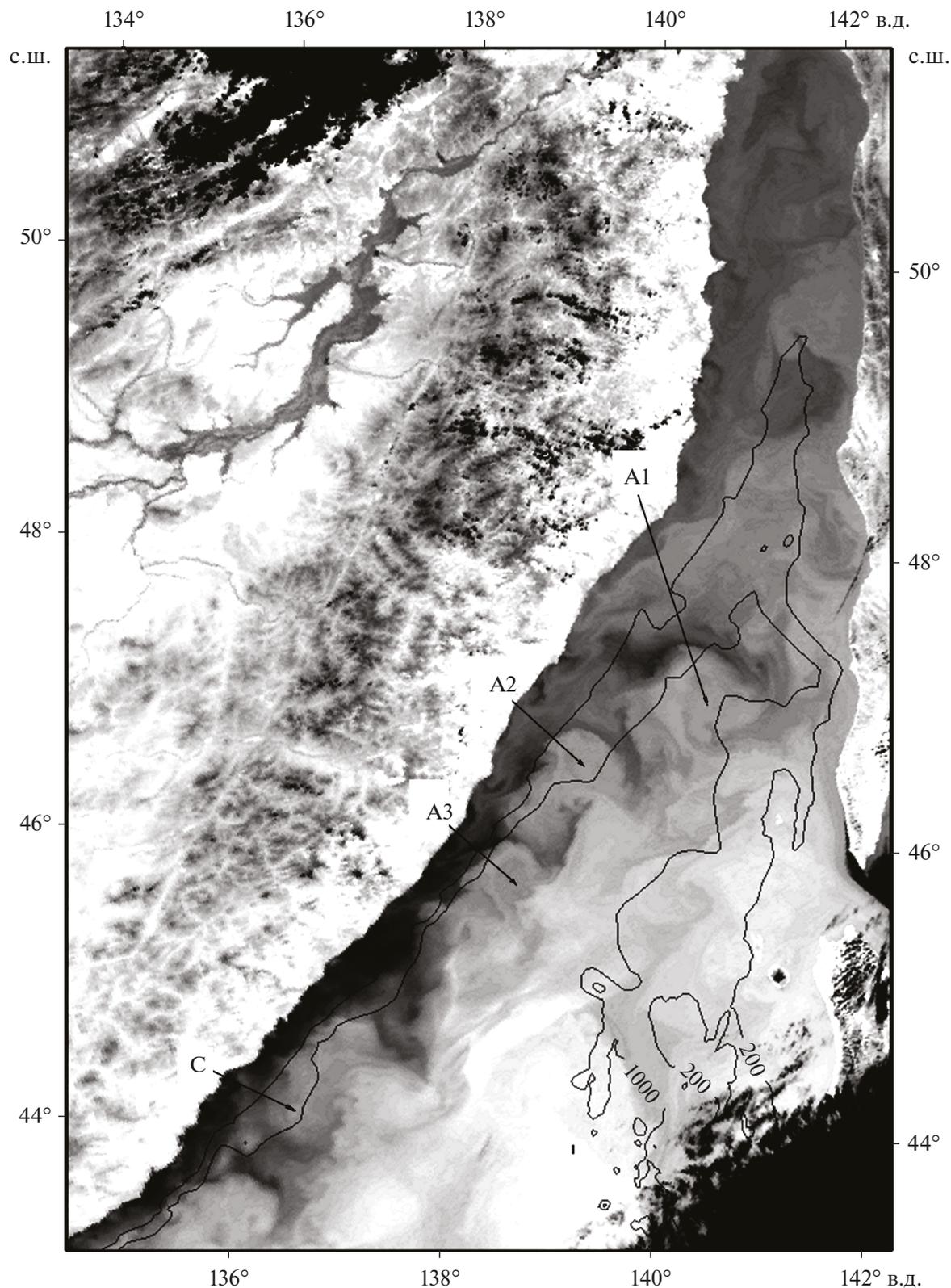


Рис. 4. Спутниковое ИК изображение (MODIS Aqua) северо-западной части Японского моря, полученное 3.09.2022 в 03:25. Темные тона на снимке соответствуют холодным водам, связанным с апвеллингом, светлые – более теплым водам прилегающих районов моря. Стрелками показаны антициклонические вихри А1, А2 и А3 и циклонический вихрь С. Струйные течения распространяются по периферии этих вихревых структур. Апвеллинговый фронт у Восточного Приморья был связан с кромкой шельфа (изобата 200 м). Мезомасштабные вихри были расположены над материковым склоном. Изобаты построены по данным GEBCO 23.

верное струйное течение (47.5° с.ш.) распространялась по периферии антициклонического вихря А1. Вторая струя (46.5° с.ш.) взаимодействовала с антициклоном А2. Струйное течение наблюдалось на северной периферии антициклонического вихря А3, расположенного ~ на 45.5° с.ш. Циклонический вихрь с центром на 44° с.ш. также взаимодействовал с водами зоны апвеллинга и участвовал в формировании апвеллинговой струи, которая огибала южную периферию этой вихревой структуры. Диаметр мезомасштабных антициклонических вихрей А1, А2 и А3 составлял 75, 60 и 40 км. Результаты, полученные при анализе ИК – изображения показывают, что струйные течения в системе Приморского течения формируются в результате взаимодействия мезомасштабного вихревого поля с водами зоны прибрежного апвеллинга.

ВЛИЯНИЕ ТАЙФУНА ХИННАМНОР НА ТЕРМИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ ВОД СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Тайфун Хиннамнор в стадии тропического шторма приблизился к побережью Южного Приморья 06.09.2022 в 09:00. Это вызвало кратковременное усиление порывистого западного и северо-восточного ветра. По результатам расчета ИА (рис. 2 *а*) прямое влияние тайфуна не привело к усилению прибрежного апвеллинга в этом районе. Апвеллинг у южного побережья Приморья усилился 8 сентября за счет благоприятных ветровых условий, которые появились при перестройке барического поля после прохождения тропического шторма.

В северо-западной части Японского моря тайфун двигался вдоль побережья Восточного Приморья со скоростью около 35 км/час. Тайфун пересек береговую линию на 47.5° с.ш. 06.09.2022 около 12:00 (рис. 1 *б*). После выхода на сушу циклонический вихрь изменил траекторию движения (рис. 1 *а*) и начал перемещаться по направлению к Охотскому морю.

По данным береговых ГМС тайфун оказал значительное влияние на прибрежные районы Восточного Приморья и Татарского пролива. На ГМС Ольга 06.09.2022 в период с 15:00 по 18:00 наблюдался западный ветер 5–10 м/с с порывами до 17 м/с (штормовой сгон). При штормовом ветровом сгоне на мелководных участках шельфа направление течений совпадает с направлением ветра. На ГМС Сосуново 6–7 сентября в период с 09:00 по 12:00 Хиннамнор вызвал сильные северные и северо-восточные ветра со средними скоростями 4–12 м/с и порывами до 17 м/с. После этого 07.09.2022 с 18:00 до 21:00 наблюдался сгонный ветер западного направления 6–16 м/с. Затем в прибрежной зоне

установился продолжительный период с благоприятными для развития апвеллинга ветровыми условиями (рис. 2 *в*). Скорости юго-западных ветров в это время достигали значений 20 м/с при порывах до 23 м/с. Вдольбереговой ветер наблюдался после выхода центра тайфуна на сушу. На ГМС Советская гавань резкое усиление ветра преимущественно южных румбов (Ю и ЮЗ) началось 06.09.2022 в 18:00 и продолжалось до 00:00 08.09.2022. Скорость ветра изменялась от 5 до 20 м/с. Эта синоптическая ситуация соответствовала движению тайфуна над континентальными прибрежными районами Татарского пролива по направлению к Охотскому морю. В этот период времени сильный вдольбереговой ветер наблюдался вдоль всего западного побережья Татарского пролива (рис. 1 *в*). Результаты расчета ИА апвеллинга показали (рис. 2 *б*), что наиболее благоприятные ветровые условия для формирования апвеллинга в Татарском проливе соответствовали периоду с 06:00 7 сентября по 00:00 8 сентября. Анализ метеорологических данных береговых ГМС гавань показал, что после прохождения тайфуна у Восточного Приморья и в Татарском проливе установились ветровые условия, благоприятные для развития апвеллинга.

Тайфун Хиннамнор оказал значительное влияние на динамику (рис. 5 *а*) и термическую структуру (рис. 5 *б*) вод северо-западной части Японского моря. На карте суммарных геострофических и ветровых течений (рис. 5 *а*) у северо-западного побережья моря можно выделить район направленных от берега течений, который был расположен между 45 и 49° с.ш. Эта ситуация соответствует ветровым условиям, благоприятным для развития апвеллинга. В этом случае у побережья формируется зона дивергенции и наблюдается компенсационный подъем глубинных вод. В центральной части моря направленное от побережья Приморья течение взаимодействовало с квазистационарным антициклоническим меандром Цусимского течения с центром у юго-западного побережья о. Хоккайдо (43.5° с.ш., 139.0° в.д.).

Распределение поверхностной температуры после прохождения тайфуна показано на рис. 5 *б*. Сравнение карт распределения ТПМ, полученных 28 августа (рис. 3) и 8 сентября (рис. 5 *б*) позволяет рассмотреть влияние тайфуна на термическую структуру вод северной части Японского моря.

После прохождения тайфуна можно выделить следующие изменения в поле ТПМ.

1. Увеличение горизонтального масштаба зоны, занятой холодными водами апвеллинга у побережья Южного и Восточного Приморья при уменьшении перепадов температуры между ядрами апвеллинга и окружающими водами. Это свиде-

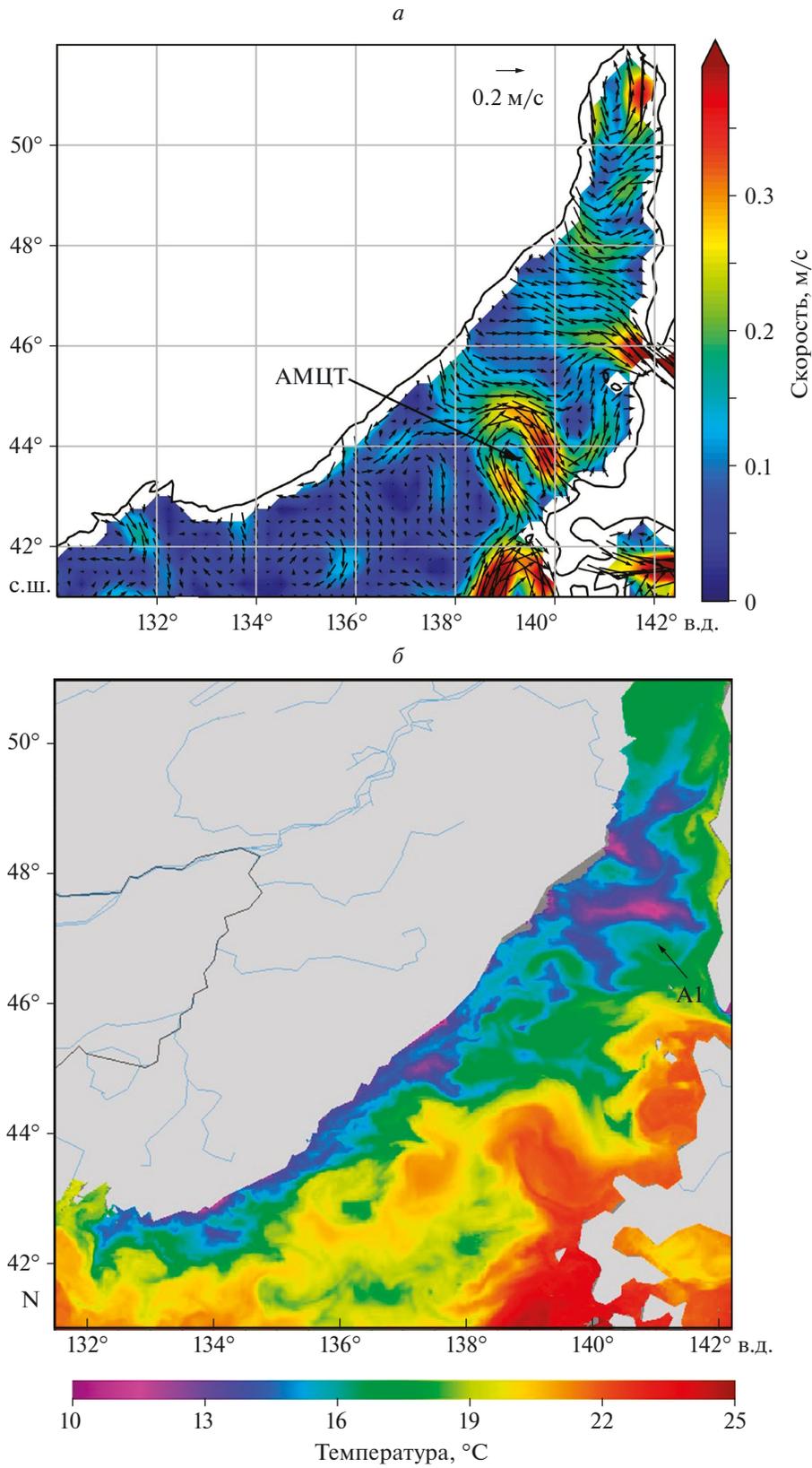


Рис. 5. Распределение скоростей суммарных геострофических и ветровых течений в поверхностном слое, полученное 7.09.2022 (а) и распределение поверхностной температуры 8.09.2022 (б) по данным GHRSSST и NOAA. Условные обозначения: АМЦТ – антициклонический меандр Цусимского течения, А1 – антициклонический вихрь в районе Татарского пролива.

тельствуют об усилении процессов перемешивания холодных вод апвеллинга и более теплых вод глубоководной части моря.

2. Адвекция холодных вод ядра апвеллинга, которое расположено на $\sim 45.5^\circ$ с. ш. (широкий выступ шельфовой зоны Приморья) в направлении центральной части моря (рис. 5 а, б). Термический след адвективного переноса холодных вод апвеллинга прослеживался от прибрежных районов Приморья до $\sim 141^\circ$ в.д. ТПМ вблизи побережья изменялась от 15.6 до 16.6° С, значения ТПМ во фронтальной зоне Цусимского течения составляли $19\text{--}20^\circ$ С. Карта распределения векторов суммарных течений (рис. 5 а) показывает, что адвекция вод апвеллинга проходила от приморского шельфа преимущественно в зональном направлении вдоль 46° с.ш. по периферии антициклонического меандра Цусимского течения. Более холодные воды, связанные с зоной приморского апвеллинга, прослеживались

на расстояние ~ 250 км от побережья. При этом наблюдалось перемещение ядра апвеллинга (область минимальных значений температуры) в направлении от берега в сторону открытого моря на расстояние около 30 км. Отрыв вод апвеллинга от берега может быть обусловлен сильным стонным ветром, который наблюдался на береговых ГМС при выходе тайфуна на побережье Приморья.

3. Распределение ТПМ, полученное 10.09.2022 (рис. 6), показывает, что у западного побережья Татарского пролива ($46.5\text{--}48.5^\circ$ с.ш.) появилась новая зона прибрежного апвеллинга с низкими значениями ТПМ. Формирование этой зоны прибрежного апвеллинга связано с длительным воздействием вдольбереговых ветров, благоприятных для развития апвеллинга (рис. 1 в, 2 б и метеорологические данные ГМС Советская гавань).

4. Резкое уменьшение температуры в струйных течениях, связанных с вихрями А1, А2 и А3 (поло-

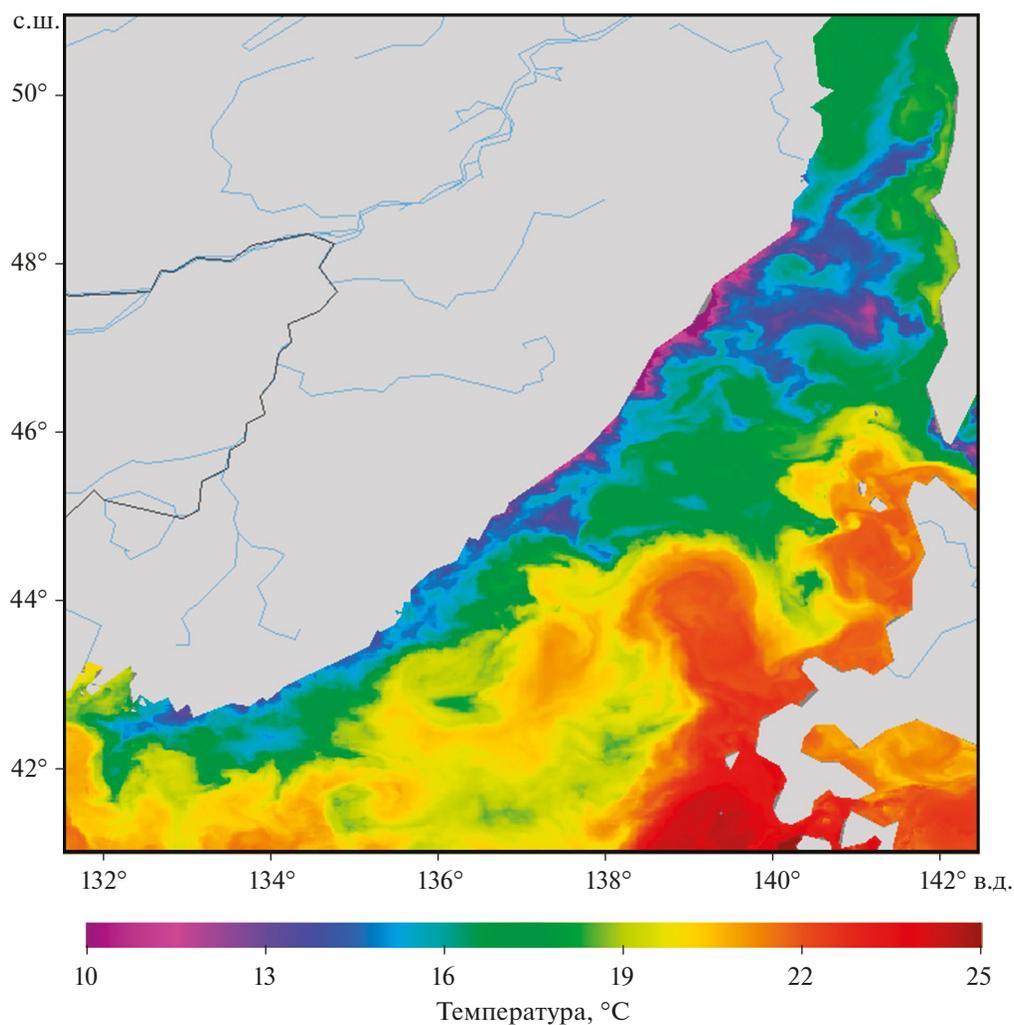


Рис. 6. Распределение поверхностной температуры в северной части Японского моря 10.09.2022 (данные GHRSSТ и NOAA). Новая зона прибрежного апвеллинга появилась у западного побережья Татарского пролива ($46.5\text{--}48.5^\circ$ с.ш.).

жение вихрей показано на рис. 4). Зона холодных апвеллинговых струй после прохождения тайфуна резко выделялась на фоне более теплых окружающих вод. Минимальные значения температуры в холодной струе на периферии антициклонического вихря А1 уменьшились до 11.1–11.5°C и по сравнению с 3 сентября (15.0–15.4°C). В качестве основной причины резкого уменьшения поверхностной температуры в струйных течениях можно рассматривать турбулентное вовлечение на нижней границе верхнего перемешанного слоя, вызванное воздействием сильного ветра при прохождении тайфуна. При этом необходимо учитывать, что стратификация в области струйных течений первоначально была ослаблена за счет присутствия более холодных вод в поверхностном слое. Наиболее хорошо выраженная полоса холодных вод, связанная с вихрем А1 (рис. 5 б) была ориентирована в зональном направлении и располагалась между 139.5° и 141.5° в.д. Продольный масштаб холодной полосы составлял ~ 125 км, поперечный – около 30 км, площадь была равна ~3750 км². Результаты расчетов, выполненные по данным скаттерометра ASCAT (07.09.2022) показали, что в окрестностях этого струйного течения (47.25–47.75° с.ш.) наблюдались положительные значения завихренности напряжения ветра, которые изменялись от $0.6 \cdot 10^{-6}$ до $4.3 \cdot 10^{-6}$ Па/м. Среднее значение завихренности в области струйного течения было

равно $3.4 \cdot 10^{-6}$ Па/м, соответствующее значение вертикальной скорости в основании экмановского слоя равно ~0.1 м/час или 2.6 м/сутки. Полученные оценки показывают, что экмановская подкачка может участвовать в охлаждении поверхностного слоя за счет вовлечения более холодных вод верхней части сезонного термоклина. Усиление вертикального перемешивания также привело к уменьшению ТПМ в северной мелководной части Татарского пролива (рис. 5 б и б).

Таким образом, влияние тайфуна на северо-западную часть Японского моря привело к увеличению зоны апвеллинга у Южного и Восточного Приморья, формированию новой зоны апвеллинга в Татарском проливе, адвекции холодных вод от побережья Приморья в центральную часть моря и к увеличению термических контрастов на границах струйных течений системы приморского апвеллинга.

Общий эффект влияния интенсивного прибрежного апвеллинга и тайфуна Хиннамнор на термическую структуру поверхностного слоя можно оценить, рассмотрев распределение аномалий ТПМ в северной части Японского моря. На рис. 7 показано пространственное распределение аномалий ТПМ в сентябре 2022 г. Аномалии рассчитывались относительно средних значений ТПМ в сентябре за 1982–2023 гг. (период глобальных

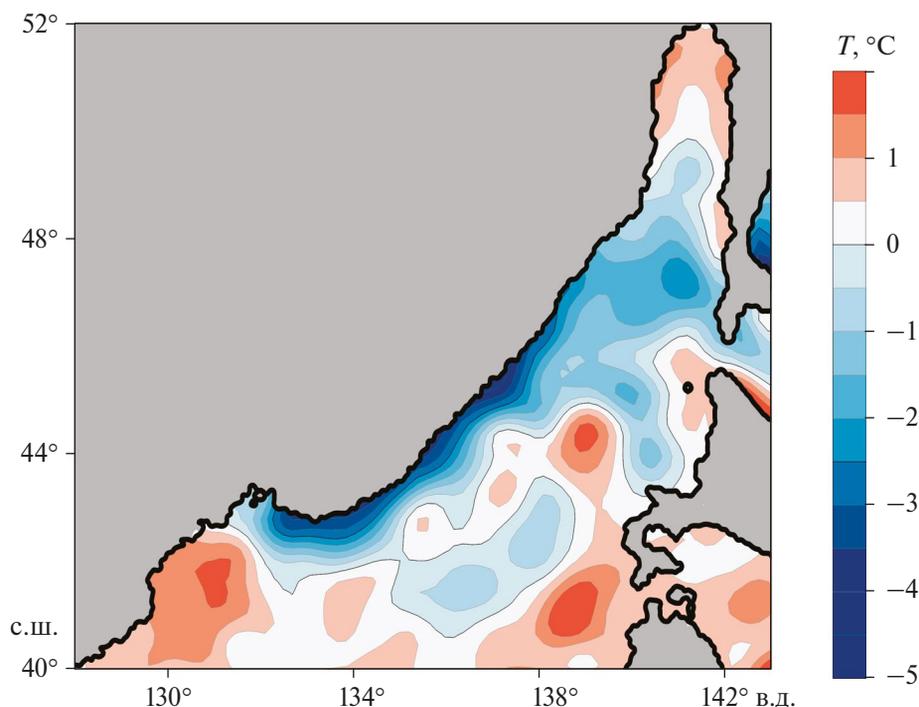


Рис. 7. Пространственное распределение аномалий ТПМ в северной части Японского моря в сентябре 2022 г. относительно средних значений за 1982–2023 гг. (данные NOAA).

наблюдений за распределением ТПМ спутников NOAA). В сентябре 2022 г. северо-западной части Японского моря преобладали отрицательные аномалии среднемесячных величин поверхностной температуры. Область максимальных значений аномалий ТПМ была расположена в зоне прибрежного апвеллинга у побережья Приморья. Максимальные амплитуды (до -4.0°C) соответствовали ядрам апвеллинга, расположенным на приморском шельфе. Высокие отрицательные значения амплитуд (до -2.0°C) были связаны с зоной адвекции холодных вод апвеллинга в центральную часть моря ($\sim 45^{\circ}$ с.ш.) и с областью холодных струйных течений в южной части Татарского пролива. Таким образом, совместное влияние интенсивного прибрежного апвеллинга и тайфуна Хиннамнор привело к формированию отрицательных аномалий ТПМ в северо-западной части Японского моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В августе–сентябре 2022 г. в прибрежных районах северо-западной части Японского моря наблюдался хорошо развитый ветровой апвеллинг. По данным спутниковых наблюдений у побережья выделялись ядра апвеллинга с низкими значениями поверхностной температуры и поперечные струйные течения, связанные с мезомасштабными вихрями системы Приморского течения. Поперечные струйные течения, которые формируются в мезомасштабной вихревом поле можно рассматривать как важный процесс, обеспечивающий связь между более продуктивными экосистемами прибрежных районов и водами глубоководной части Японского моря.

Тайфун Хиннамнор оказал существенное влияние на динамическую и термическую структуру вод северную часть Японского моря. Под влиянием тайфуна усилился апвеллинг у восточного побережья Приморья. У северо-восточного побережья Приморья наблюдался отрыв вод апвеллинга от побережья и последующий адвективный перенос холодных вод в сторону открытой части моря. Ветровые условия, связанные с прохождением тайфуна привели к формированию новой зоны апвеллинга в районе Татарского пролива. Под воздействием тайфуна за счет усиления процессов вертикального перемешивания произошло уменьшение температуры в поперечных струйных течениях системы приморского апвеллинга. Холодные апвеллинговые струи после прохождения тайфуна хорошо выделялись на фоне более теплых окружающих вод. Совместный эффект интенсивного прибрежного ветрового апвеллинга и тайфуна на термическую структуру верхнего слоя привел к формированию хорошо выраженной отрицательной аномалии ТПМ в северо-западной части Японского моря.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят анонимных рецензентов за внимательное отношение к работе и за полезные замечания, которые помогли улучшить содержание статьи.

Данные SST предоставлены Group for High Resolution Sea Surface Temperature (GHRSSST) и the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнялись в рамках гос. задания ТОИ ДВО РАН по теме № 6, пер. № 124022100079-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г., Крапивин В.Ф.* Космический мониторинг тропических циклонов. М.: Научный мир, 2014. 508 с.
- Боуден К.* Физическая океанография прибрежных вод. М.: Мир, 1988. 322 с.
- 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.
- Жабин И.А., Дмитриева Е.В.* Сезонная и синоптическая изменчивость ветрового апвеллинга у побережья Южного Приморья (Японское море) // *Вестник ДВО РАН*. 2014. № 5. С. 25–31.
- Жабин И.А., Дмитриева Е.В., Кильматов Т.Р., Андреев А.Г.* Влияние ветровых условий на изменчивость апвеллинга у побережья Приморья (северо-западная часть Японского моря) // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 3. С. 58–67.
- 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.
- Тропические циклоны. Результаты исследований советских ученых. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 54 с.
- Bakun A.* Coastal upwelling indices, west coast of North America // NOAA Technical Report NMF 671. 1973. 103 pp.
- Bakun A.* Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling // *Science*. 1990. V. 247. P. 198–201.
- Che Y., Guo B., Mantravadi V.S., Wang J., Ji Z.* The impact of typhoon “In-Fa” (2021) on temperature, salinity, and chlorophyll-a concentration in the upwelling area of northwestern East China Sea // *Atmosphere*. 2023. V. 14. N 8. 1226. <https://doi.org/10.3390/atmos14081226>.
- Filonov A., Tereshchenko I., Ladah L.B., Monzon C., Velázquez-Muñoz F., Montes-Arechiga J.* Coastal response to the passage of tropical cyclone Juliette on the Central Pacific Coast of Mexico // *Geofísica Internacional*. 2021. V. 60. № 4. P. 357–366. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2021.60.4.2161>.
- Gonzalez-Nuevo G., Gago J., Cabanas J.M.* Upwelling index: a powerful tool for marine research in the NW Iberian upwelling system. *J. Oper. Oceanogr.* 2014, V. 7. № 1. P. 47–57. doi: 10.1080/1755876x.2014.11020152.
- Hong B., Huang X., Liu S., Xu H.* Impact of typhoon on coastal upwelling off the Eastern Hainan Island: A case study of typhoon

- Rammasun (2014) // *Fron. Mar. Sci.* 2022. V. 9. P. 920825–920839. 10.3389/fmars.2022.920825.
- Kawaguchi, Y., Yabe I., Senjyu T., Sakai A.* Amplification of typhoon-generated near-inertial internal waves observed near the Tsushima oceanic front in the Sea of Japan // *Sci. Rep.* 2023. V. 13. 8387. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33813-9>.
- Kuo Y., Ming-An Lee M.-A., Yi Chang Y.* Satellite observations of typhoon-induced sea surface temperature variability in the upwelling region off northeastern Taiwan // *Remote Sensing.* 2020. V.12. N 20. 3321. doi:10.3390/rs12203321.
- Li X., Zhang X., Fu D., Liao S.* Strengthening effect of super typhoon Rammasun (2014) on upwelling and cold eddies in the South China Sea // *J. Ocean. Limnol.* 2021. V. 39. P. 403–419.
- Large W. G., Pond S.* Open momentum flux measurements in moderate to strong winds // *J. Phys. Oceanogr.* 1981. V. 11. № 3. P. 324–336. doi: 10.1007/s00343-020-9239-x.
- Mooers C.N.K., Robinson A.R.* Turbulent jets and eddies in the California Current and inferred crossshore transports // *Science.* 1984. V. 223. N 4631. P. 51–53.
- Nikitin A.A., Tsyppsheva I.L., Zuenko Y.I.* Spatial patterns of the Primorye Current in the northwestern East/Japan Sea on satellite images and standard sections // *Ocean Sci. J.* 2023. V. 58. 22. <https://doi.org/10.1007/s12601-023-00116-z>
- Strub P., Kosro P., Huyer A.* The nature of the cold filaments in the California Current System // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 14.743–14.768.
- Park K.A., Kim K.R.* Unprecedented coastal upwelling in the East/Japan Sea and linkage to longterm large variations // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. L09603. <https://doi.org/10.1029/2009GL042231>
- Xie L.L., He C.-F., Li M.-M., Tian J.J., Jing, Z.Y.* Response of sea surface temperature to typhoon passages over the upwelling zone east of Hainan Island // *Advances in Marine Science.* 2017. V. 35. P. 8–19. (In Chinese with English abstract).
- Zhang H.-M., Bates J.J., Reynolds R.W.* Assessment of composite global sampling: Sea surface wind speed // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. L17714. <https://dx.doi.org/10.1029/2006GL027086>.
- Zheng M., Xie L., Zheng Q., Li M., Chen F., Li J.* Volume and nutrient transports disturbed by the typhoon Chebi (2013) in the upwelling zone east of Hainan Island, China // *J. Mar. Sci. Eng.* 2021. V. 9. 324. <https://doi.org/10.3390/jmse9030324>.

The Impact of Typhoon “Hinnamnor” (September 2021) on Coastal Upwelling in the Northwestern Japan Sea According Satellite Observations

I. A. Zhabin¹, E. V. Dmitrieva¹, V. A. Dubina¹, S. N. Taranova¹

¹*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the RAS, Vladivostok, Russia*

Enhanced wind-driven water upwelling was observed off the north-west coast of the Japan Sea in the summer of 2022. The upwelling index calculation showed that the coastal upwelling was induced by offshore Ekman transport. The offshore transport is largely controlled by mesoscale processes, involving mesoscale eddies and filaments. Based on the multisatellite and meteorological data sets our results provide opportunity to observe the upwelling response to strong typhoon Hinnamnor (September 2022). The typhoon resulted in the separation of the upwelling core from the coast and subsequent advective transport of cold waters toward the deep part of the northern Japan Sea. The intensification of advection was determined by the interaction of upwelling waters with the mesoscale anticyclonic meander of the Tsushima Current. Under the influence of strong winds of typhoon a sharp temperature decrease in upwelling filaments was observed. The typhoon increased upwelling in the western shelf region of the Tartar Strait. In September 2022 coastal upwelling resulted in the formation of a negative surface temperature anomaly in the northern part of the Japan Sea.

Keywords: Japan Sea, wind-driven coastal upwelling, Primorye current, mesoscale eddies, upwelling filaments, typhoon “Hinnamnor”, multisatellite data, meteorological observations

REFERENCES

- Bakun A.* Coastal upwelling indices, west coast of North America // NOAA Technical Report NMF 671. 1973. 103 pp.
- Bakun A.* Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling // *Science.* 1990. V. 247. P. 198–201.
- Bondur V.G., Krapivin V.F.* Kosmicheskiy monitoring tropicheskikh tsiklonov. [Space monitoring of tropical cyclones]. Moscow. Scientific World. 2014. 508 p. (in Russian).
- Bowden K.F.* Physical oceanography of coastal waters. Ellis Horwood Ser. Mar. Sci. John Wiley & Sons, Inc. 1984. Somerset, N.J. 302 p.
- Che Y., Guo B., Mantravadi V.S., Wang J., Ji Z.* The impact of typhoon “In-Fa” (2021) on temperature, salinity, and chlorophyll-a concentration in the upwelling area of northwestern East China Sea // *Atmosphere.* 2023. V. 14. N 8. 1226. <https://doi.org/10.3390/atmos14081226>.
- Filonov A., Tereshchenko I., Ladah L.B., Monzon C., Velázquez-Muñoz F., Montes-Arechiga J.* Coastal response to the passage of tropical cyclone Juliette on the Central Pacific Coast of Mexico // *Geofísica Internacional.* 2021. V. 60. N 4. P. 357–366. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2021.60.4.2161>.
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Ostrovskii A.G.* Poverkhnostnaya tsirkulyatsiya Yaponskogo morya (sputnikovaya informatsiya i dannye dreyfuyushchikh buev) [Surface circulation of the Japan Sea (satellite information and drifters data)] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 1998. N 1. P. 66–83 (in Russian).
- Gonzalez-Nuevo G., Gago J., Cabanas J.M.* Upwelling index: a powerful tool for marine research in the NW Iberian up-

- welling system. *J. Oper. Oceanogr.* 2014, V. 7. N 1. P. 47–57. doi: 10.1080/1755876x.2014.11020152.
- Hong B., Huang X., Liu S., Xu H.* Impact of typhoon on coastal upwelling off the Eastern Hainan Island: A case study of typhoon Rammasun (2014) // *Fron. Mar. Sci.* 2022. V. 9. P. 920825–920839. 10.3389. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.920825>.
- Kawaguchi, Y., Yabe I., Senju T., Sakai A.* Amplification of typhoon-generated near-inertial internal waves observed near the Tsushima oceanic front in the Sea of Japan // *Sci. Rep.* 2023. V. 13. 8387. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33813-9>
- Kuo Y., Ming-An Lee M.-A., Yi Chang Y.* // Satellite observations of typhoon-induced sea surface temperature variability in the upwelling region off northeastern Taiwan // *Remote Sensing.* 2020. V.12. N 20. 3321. doi: 10.3390/rs12203321.
- Li X., Zhang X., Fu D., Liao S.* Strengthening effect of super typhoon Rammasun (2014) on upwelling and cold eddies in the South China Sea // *J. Ocean. Limnol.* 2021. V. 39. P. 403–419. <https://doi.org/10.1007/s00343-020-9239-x>.
- Large W.G., Pond S.* Open momentum flux measurements in moderate to strong winds // *J. Phys. Oceanogr.* 1981. V. 11. № 3. P. 324–336.
- Mooers C.N.K., Robinson A.R.* Turbulent jets and eddies in the California Current and inferred crossshore transports // *Science.* 1984. V. 223. N 4631. P. 51–53.
- Nikitin A.A., Tsypysheva I.L., Zuenko Y.I.* Spatial patterns of the Primorye Current in the northwestern East/Japan Sea on satellite images and standard sections // *Ocean Sci. J.* 2023. V. 58, 22. <https://doi.org/10.1007/s12601-023-00116-z>.
- Nikitin A.A., Djakov B.S., Kapshiter A.V.* The Primorskoe current at standard sections and in satellite images of the Sea of Japan's surface // *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics.* 2020. V. 56. P. 1605–1614.
- Park K.A., Kim K.R.* Unprecedented coastal upwelling in the East/Japan Sea and linkage to longterm large variations // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. L09603. <https://doi.org/10.1029/2009GL042231>.
- Strub P., Kosro P., Huyer A.* The nature of the cold filaments in the California Current System // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 14.743–14.768.
- Тропические циклоны. Результаты исследований советских ученых. [Tropical cyclones. Results of research by Soviet scientists]. L.: Гидрометеоздат. 1989. 54 p. (in Russian).
- Xie L.L., He C.-F., Li M.-M., Tian J.J., Jing, Z.Y.* Response of sea surface temperature to typhoon passages over the upwelling zone east of Hainan Island // *Advances in Marine Science.* 2017. V. 35. P. 8–19. (In Chinese with English abstract)
- Zhabin I.A., Dmitrieva E.V.* Sezonnaya i sinopticheskaya izmenchivost vetrovogo apvellinga u poberezhya yuzhnogo Primorya (Yaponskoe more) [Seasonal and mesoscale variability of wind upwelling off the southern Primorye coast (the Japan Sea)] // *Vestnik DVO RAN.* 2014. N 5. P. 25–31. (in Russian).
- Zhabin I.A., Dmitrieva E.V., Kil'matov T.R., Andreev A.G.* Wind effects on the upwelling variability in the coastal zone of Primorye (the northwest of the Sea of Japan) // *Russian Meteorology and Hydrology.* 2017. V. 42. P. 181–188.
- Zhang H.-M., Bates J.J., Reynolds R.W.* Assessment of composite global sampling: Sea surface wind speed // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. L17714. <https://dx.doi.org/10.1029/2006GL027086>.
- Zheng M., Xie L., Zheng Q., Li M., Chen F., Li J.* Volume and nutrient transports disturbed by the typhoon Chebi (2013) in the upwelling zone east of Hainan Island, China // *J. Mar. Sci. Eng.* 2021. V. 9. 324. <https://doi.org/10.3390/jmse9030324>.