

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕТНЕГО ВЕТРОВОГО АПВЕЛЛИНГА У КОРЯКСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ БЕРИНГОВА МОРЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2022 г. И. А. Жабин^а, *, Е. В. Дмитриева^а, В. А. Дубина^а, В. А. Лучин^а

^аТихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

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

Поступила в редакцию 24.10.2021 г.

Изменчивость апвеллинга у Корякского побережья (северо-западная часть Берингова моря) исследована на основе данных о ветре, полученных при помощи скаттерометров SeaWinds спутника QuikSCAT (2000–2009) и ASCAT спутника MetOp-A (2010–2020). Интенсивность апвеллинга оценивалась по величине вызванного ветром и направленного от берега экмановского переноса вод (индекс апвеллинга). Полученные результаты показывают, что апвеллинг у Корякского побережья в основном связан с летними южными ветрами над акваторией Берингова моря. На Корякском шельфе апвеллинг наблюдается в период с июня по август при значительной межгодовой изменчивости этого процесса. Продолжительность и интенсивность апвеллинга определяется региональными особенностями ветрового режима. Сезонная изменчивость южных ветров, благоприятных для развития апвеллинга, в основном определяется положением и интенсивностью летней Дальневосточной депрессии (региональный атмосферный центр низкого давления). Изменения барического поля хорошо коррелируют со сменой процессов апвеллинга и даунвеллинга у Корякского побережья. Интенсивный апвеллинг связан с развитой Дальневосточной депрессией. Апвеллинг сменяется даунвеллингом при ослаблении этого центра действия атмосферы.

Ключевые слова: ветровой апвеллинг, синоптическая, сезонная и межгодовая изменчивость, приливный ветер, SeaWinds/QuikSCAT, ASCAT/MetOp-A, индекс апвеллинга, летний тип атмосферной циркуляции, Дальневосточная депрессия, северо-западная часть Берингова моря, Корякское побережье

DOI: 10.31857/S0205961422050104

ВВЕДЕНИЕ

Под апвеллингом обычно понимается выход придонных вод в верхний слой океана. Прибрежный апвеллинг вызывается ветром, направленным вдоль побережья таким образом, что берег (в северном полушарии) расположен слева. В этом случае под влиянием вращения Земли общий перенос вод направлен от берега и дивергенция поверхностных течений у побережья приводит к компенсационному подъему холодных придонных вод с высоким содержанием биогенных элементов. На апвеллинг оказывают влияние синоптическая, сезонная и межгодовая изменчивость поля ветра, плотностная стратификация и морфология шельфа. Ветровой апвеллинг относится к основным процессам, определяющим биологическую продуктивность вод прибрежных районов океана.

Корякский шельф расположен в северо-западной части Берингова моря между Олюторским и Анадырским заливами. На юге условной границей Корякского шельфа является мыс Олютор-

ский, на севере – мыс Наварин. Общая протяженность корякской шельфовой зоны составляет около 500 км, ширина шельфа изменяется от 20 км (южная часть района) до 70 км (район, прилегающий к м. Наварин). У Корякского побережья в летний период наблюдается апвеллинг (Wang et al., 2009). Апвеллинг в этом районе был хорошо выражен на картах распределения поверхностной температуры (июнь, июль и август), построенных по данным радиометров AVHRR, установленных на спутниках серии NOAA. Апвеллинг наблюдался в узкой прибрежной полосе, вытянутой вдоль Корякского побережья. По данным судовых наблюдений в северной части Корякского шельфа в зоне апвеллинга наблюдались низкие значения поверхностной температуры, высокие концентрации биогенных элементов и высокие значения первичной продукции (Kivva, Chulchekov, 2013). Ветровой апвеллинг в этом районе играет ключевую роль в изменении продукционных характеристик Корякского шельфа.

Спутниковое изображение в термическом диапазоне, полученное 18 августа 2012 г. (спутник Landsat-7, рис. 1) показывает, что Корякский апвеллинг хорошо выражен в поле температуры поверхности моря (ТПМ). Апвеллинговый фронт, отделяющий холодные воды прибрежного апвеллинга от более теплых вод открытой части моря располагался приблизительно над изобатами 150–200 м. Ширина зоны прибрежного апвеллинга изменялась от 15 до ~100 км. Прямой выход холодных придонных вод на поверхность происходит в сравнительно узкой прибрежной полосе, горизонтальный масштаб которой определяется радиусом деформации Россби (~5 км для Корякского шельфа). Ширина зоны апвеллинга определяется по фактическому понижению ТПМ, связанному как с прибрежным подъемом холодных вод, так и с адвекцией вод апвеллинга в направлении от побережья. Во фронтальной зоне апвеллинга наблюдались поперечные струйные течения и мезомасштабные вихри.

При изучении прибрежного апвеллинга обычно используются спутниковые данные о распределении ТПМ. Возможность применения этого типа спутниковой информации для исследования пространственно-временной изменчивости апвеллинга у Корякского побережья существенно ограничена неблагоприятными условиями облачности. Для изучения апвеллинга в этом районе можно использовать данные о приводном ветре, получаемые на регулярной основе при помощи спутниковых скаттерометров (микроволновых радаров). В этом случае интенсивность апвеллинга можно оценить по величине вызванного ветром и направленного от берега экмановского переноса вод (индекс апвеллинга). Данные, полученные при помощи скаттерометра SeaWinds спутника QuickScat и скаттерометра ASCAT, установленного на спутнике MetOp-A, отражают основные особенности регионального ветрового режима и позволяют рассмотреть метеорологические ситуации, благоприятные для развития апвеллинга. В последнее время такой подход достаточно широко применяется при исследовании прибрежного апвеллинга в различных районах Мирового океана (например, (Alvarez et al., 2008; Ramanantsoa et al., 2018)). Исходя из этого были определены основные задачи работы – на основе анализа спутниковых данных о ветре и распределении ТПМ исследовать синоптическую, сезонную и межгодовую изменчивость апвеллинга у Корякского побережья (северо-западная часть Берингова моря).

ДАННЫЕ И МЕТОД РАСЧЕТА ИНДЕКСА АПВЕЛЛИНГА

Данные о скорости и направлении ветра были получены при помощи скаттерометра SeaWinds,

установленном на спутнике QuikSCAT. Диапазон измерения скорости ветра – от 3 до 20 м/с при точности 2 м/с, точность измерения направления ветра – 20° (Freilich and Dunbar, 1999). В работе был использован среднемесячный массив данных о ветре (2000–2009 гг., <https://chapman.ceoas.oregonstate.edu/scow/>). Скаттерометр ASCAT спутника MetOp-A начал действовать на орбите в 2007 г. В работе использованы данные о ветре, полученные в период с 2010 по 2020 гг. (<https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/>). Точность измерения скорости и направления ветра скаттерометров SeaWinds и ASCAT практически совпадают (Bentamy, 2008). Пространственное разрешение исходного массива составляет 0.25° × 0.25°.

Спутниковые скаттерометры не позволяют получать информацию о ветре в прибрежной зоне на расстоянии 20–30 км от береговой линии. Скаттерометры SeaWinds и ASCAT используют различные принципы сканирования (Bentamy et al., 2012), поэтому данные, полученные со спутников QuikSCAT и MetOp-A в работе рассматриваются отдельно.

Для исследования пространственно-временной изменчивости апвеллинга по значениям касательного напряжения ветра был рассчитан индекс апвеллинга (Bakun, 1973), позволяющий получить оценки направленного от берега экмановского переноса вод в поверхностном слое. Теория Экмана была разработана для глубокого моря (глубина слоя трения значительно меньше глубины моря). В этом случае общий перенос воды под действием ветрового напряжения и вращения Земли направлен под углом 90° вправо от направления ветра (в северном полушарии). Впервые объяснение механизма формирования прибрежного апвеллинга было дано Свердрупом (Sverdrup et al., 1942). В этой работе апвеллинг рассматривался с позиций теории дрейфовых течений, поскольку модель Экмана позволяет объяснить этот физический процесс. Экмановский перенос в направлении, перпендикулярном береговой линии рассчитывается по уравнению (Smith, 1968):

$$M = \frac{\bar{\tau} \cdot \hat{i}}{\rho f},$$

где $\bar{\tau}$ – вектор касательного напряжения ветра, \hat{i} – единичный вектор, направленный по касательной к береговой линии, ρ – плотность морской воды, f – параметр Кориолиса.

На этой основе для изучения изменчивости прибрежного апвеллинга Э. Бакун (1973) предложил использовать так называемый индекс прибрежного апвеллинга. В настоящее время этот индекс продолжает использоваться NOAA (Национальное управление океанических и атмосферных исследований США) в океанографических и рыбопромышленных исследованиях в качестве показателя,

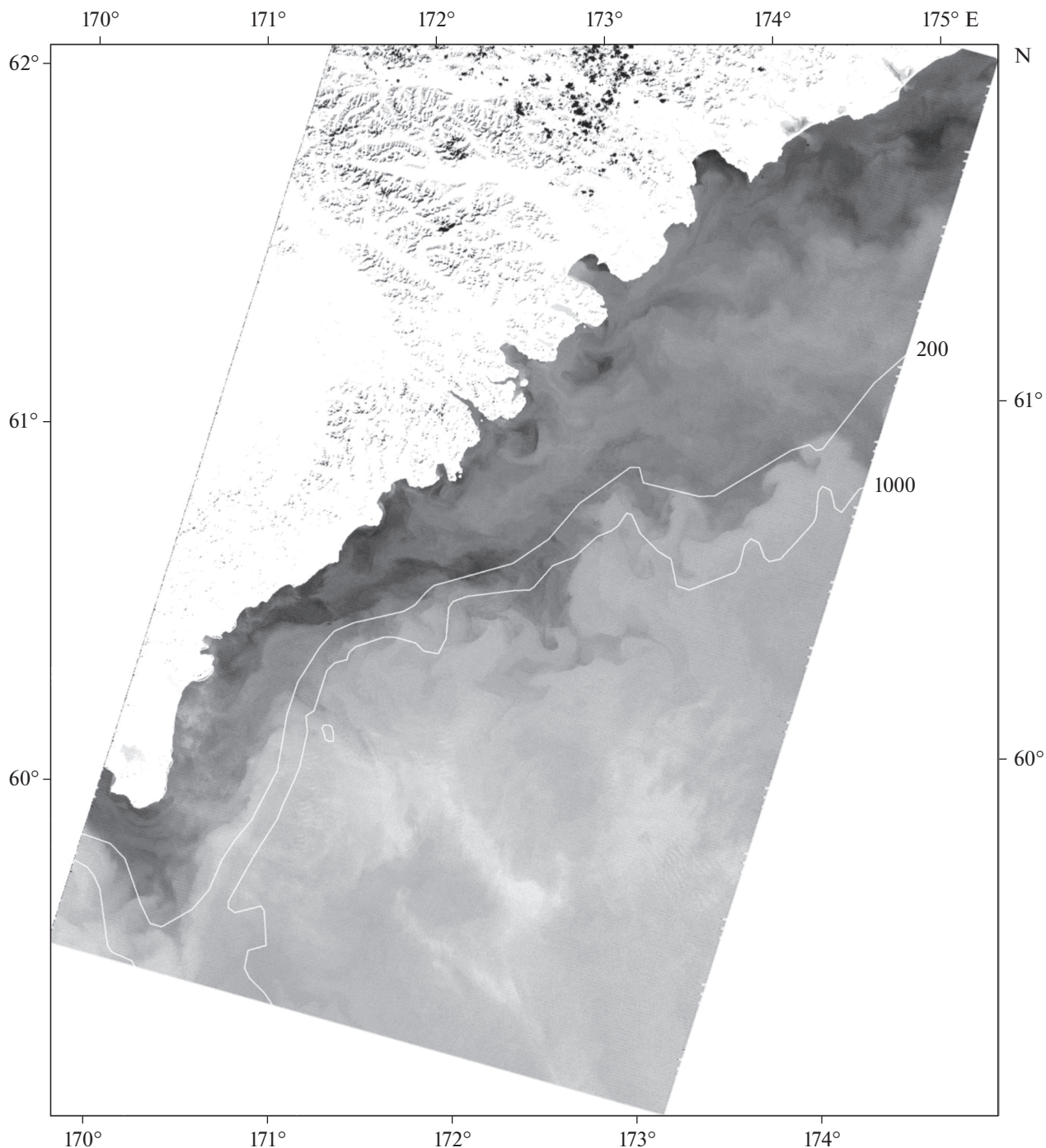


Рис. 1. Спутниковое изображение Корякского апвеллинга в термическом диапазоне, полученное 18 августа 2012 г со спутника Landsat-7. На снимке показано положение изобат 200 и 1000 м.

характеризующего относительную интенсивность этого процесса (<https://www.pfeg.noaa.gov/products/PFEL/modeled/indices/upwelling/upwelling.html>).

На первом этапе расчетов определялась величина зональной и меридиональной составляющих ветрового переноса:

$$Q_x = \tau_y / \rho f, \quad Q_y = -\tau_x / \rho f,$$

где τ_y и τ_x – значения зональной и меридиональной составляющих касательного напряжения ветра, ρ – плотность морской воды (1025 кг/м^3), f – параметр Кориолиса на средней широте Корякского шельфа ($1.278 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$). Ветровой пе-

ренос вод, направленный перпендикулярно береговой линии (индекс апвеллинга) рассчитывался по уравнению:

$$UI = -Q_x \sin \Theta + Q_y \cos \Theta, \quad \Theta = \alpha,$$

где α – угол между прямой, аппроксимирующей береговую линию и соответствующей параллелью. Для Корякского побережья $\alpha = 45^\circ$. Для получения размерности, соответствующей скорости объемного переноса вод, индекс апвеллинга нормировался на единицу длины береговой линии ($\text{м}^3/\text{с}/10$ м береговой линии). Положительные значения индекса апвеллинга соответствуют направлению от берега ветровому переносу, который вызывает прибрежный апвеллинг. Отрицательные значения индекса апвеллинга соответствуют даунвеллингу (опусканию вод). В общем случае, использованный в работе индекс апвеллинга (или индекс Бакуна) позволяет выделить временные интервалы с благоприятными для развития апвеллинга ветровыми условиями и количественно оценить относительную интенсивность этого процесса. При различных интервалах временного осреднения исходных массивов данных о ветре результаты расчета индекса апвеллинга дают возможность рассмотреть синоптическую, сезонную и межгодовую изменчивость апвеллинга у Корякского побережья.

Для исследования пространственного распределения термических контрастов в поле ТПМ в зоне Корякского апвеллинга в работе использовались изображения в инфракрасном диапазоне спектра, полученные при помощи спектрометра MODIS спутника Aqua, полученные в 2012 г.

Для подтверждения и проверки результатов, полученных на основе анализа спутниковых данных, в работе использовались среднемесячные (климатические) карты распределения поверхностной температуры, которые были построены на основе массива океанографической информации, полученной в западной части Берингова моря. Основу часть массива составляют данные наблюдений Росгидромета, ТИПРО-Центра, Гидрографической службы ТОФ и Российской Академии Наук. В настоящее время общий массив включает в себя данные ~35 тыс. океанографических станций, полученные в период с 1929 по 2019 гг.

В качестве дополнительной информации в работе были использованы среднемесячные поля приземного атмосферного давления (реанализ NCEP, <https://psl.noaa.gov/cgi-bin/data/composites/printpage.pl>).

ВЛИЯНИЕ СИНОПТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ВЕТРОВЫХ УСЛОВИЙ НА АПВЕЛЛИНГ У КОРЯКСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ

Спутниковые инфракрасные изображения шельфовой зоны у Корякского побережья Берингова моря, полученные в 2012 г. при помощи спектрометра MODIS спутника Aqua показывают, что более холодные воды апвеллинга у побережья были зарегистрированы в районе м. Олюторский и в южной части Корякского шельфа 3 июля (рис. 2, а). Выход холодных вод на поверхность у побережья также наблюдался на отдельных участках северной части шельфовой зоны. В августе (рис. 2, б–в) зона апвеллинга была отчетливо выражена вдоль всего Корякского побережья. Поперечный масштаб зоны холодных вод изменялся от 15 до ~100 км.

В целом, циркуляция вод вблизи Корякского побережья определяется Берингоморским склоновым течением, которое при подходе к материку отклоняется в юго-западном направлении и следует над материковым склоном шельфа со скоростью 0.05–0.1 м/с. Это течение прямо не связано с зоной апвеллинга и определяется как составная часть общей циркуляции вод Берингова моря. Антициклонические мезомасштабные вихри Берингоморского склонового течения могут прямо взаимодействовать с водами Корякского апвеллинга (Андреев, 2019). Как показывают относительные оценки скорости и направления геострофических течений в Корякской шельфовой зоне в летний период наблюдается течение противоположного направления, которое следует вдоль побережья в северо-восточном направлении со скоростями < 0.05 м/с (Басюк и др., 2012). Это течение известно под именем “Наваринского” течения. Высокоскоростное ядро этого прибрежного течения (скорости >0.05 м/с) приблизительно совпадает с апвеллинговым фронтом, положение которого определялось по данным спутниковых наблюдений. Это фронтальное течение может быть прямо связано с системой летнего прибрежного апвеллинга у Корякского побережья.

Прибрежный апвеллинг вызывается благоприятными для развития апвеллинга ветровыми условиями, что приводит к подъему холодных придонных вод. Апвеллинг уменьшает уровень моря в прибрежной зоне. Разница в уровне моря между прибрежной и внешней частями шельфа создает поперечный градиент давления, с которым связано поверхностное вдольбереговое геострофическое течение, направление которого совпадает с направлением ветра. С апвеллингом могут быть связаны значительные горизонтальные градиенты плотности, что приводит к формированию апвеллингового фронта. Этот фронт обычно ограничивает зону апвеллинга и может

рассматриваться как граница между водами прибрежного апвеллинга и прилегающими поверхностными водами открытой части моря. За счет градиента плотности в направлении поперек фронта формируется бароклинное геострофическое фронтальное течение. Как следствие, водообмен между водами апвеллинга и открытой частью моря может происходить за счет бароклинной неустойчивости этого фронтального течения, которая приводит к образованию меандров, мезомасштабных вихрей и поперечных струйных течений.

Временная изменчивость индекса апвеллинга, характеризующая влияние ветровых условий на возможность развития и относительную интенсивность апвеллинга у Корякского побережья в 2012 г., представлена на рис. 3, а. В качестве исходных данных в этом случае использовались осредненные за трехдневный период значения касательного напряжения ветра (<https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap/erdQAstress3-day.graph>). Положение точек, по которым рассчитывалось значение этого индекса, показано на рис. 3, б. В точках, для которых проводится расчет индекса апвеллинга, глубина места (Н) должна превышать глубину экмановского слоя трения (D). В этом случае для оценки переноса вод в поверхностном слое можно использовать уравнения Экмана, полученные для глубокого моря. При глубине моря $H > D$ вдольбереговой ветер вызывает экмановский перенос, направленный перпендикулярно к береговой линии, что приводит к дивергенции течений у побережья и подъему придонных вод.

Оценки глубины залегания слоя трения на Корякском шельфе можно получить, используя статистические данные о ветре на метеостанции “Апука” (Олюторка), расположенной в южной части Корякского побережья. Средняя скорость ветра в летний период (сезон апвеллинга) на этой станции составляла 3.3–3.6 м/с, повторяемость слабых ветров (0–5 м/с) изменялась в диапазоне 80–85%. Повторяемость ветра со скоростями 10–15 м/с составляла 1–2%. (<http://www.esimo.ru/atlas/Beringovo>). Расчеты коэффициента турбулентной вязкости (A) и глубины трения (D) проводились по формулам, предложенным в работе (Боуден, 1988).

Результаты расчетов показали, что при скорости ветра 5 м/с значения этих параметров равны: $A = 3.425 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$; $D = 25 \text{ м}$. При скорости ветра 10 м/с соответствующие значения составляют $A = 1.37 \times 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$ и $D = 45 \text{ м}$. Расчетные точки (рис. 3, а) были расположены в окрестностях изобаты 100 м, в глубоководной части шельфа и в области материкового склона. Таким образом, в точках, для которых проводился расчет индекса апвеллинга, глубина места превышает глубину

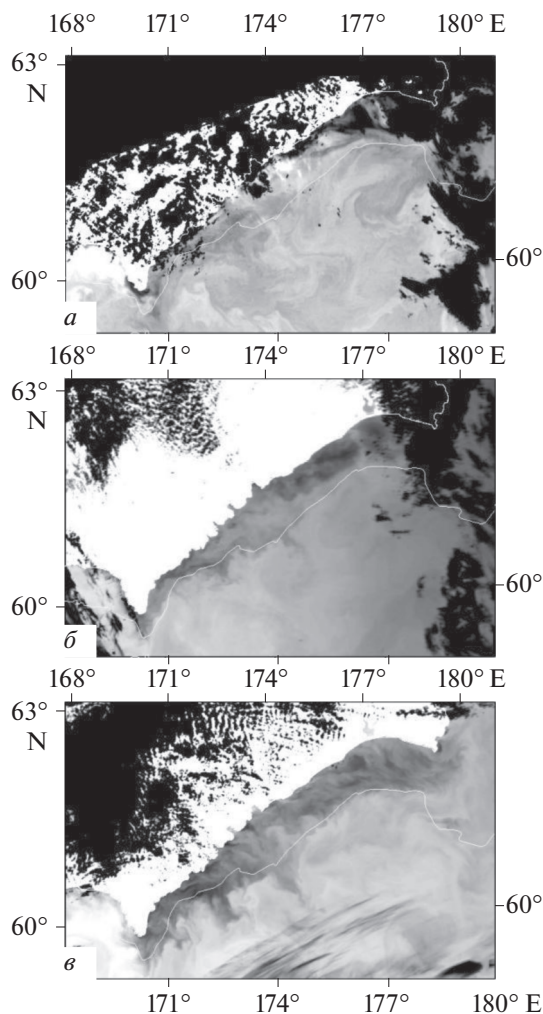


Рис. 2. Спутниковые инфракрасные изображения (MODIS Aqua) зоны прибрежного апвеллинга у Корякского побережья, полученные 3 июля (а), 19 августа (б) и 25 августа (в) 2012 г. Темные тона на спутниковых снимках соответствуют холодным водам апвеллинга, светлые — более теплым водам прилегающих районов северо-западной части Берингова моря. На снимках показано положение изобаты 200 м.

трения. В этом случае для оценки переноса вод в поверхностном слое можно использовать уравнения Экмана, полученные для глубокого моря.

Временной ход значений индекса апвеллинга показывает, что в период наблюдений ветровые условия этого района определялись последовательным чередованием более продолжительных по времени “событий” апвеллинга и короткопериодных случаев даунвеллинга. Продолжительные по времени события апвеллинга, связанные с ветром, имеющим хорошо выраженную вдольбереговую составляющую (ветра юго-западного направления) наблюдались в основном в период с 15 июня по 2 сентября. В это время апвеллинг

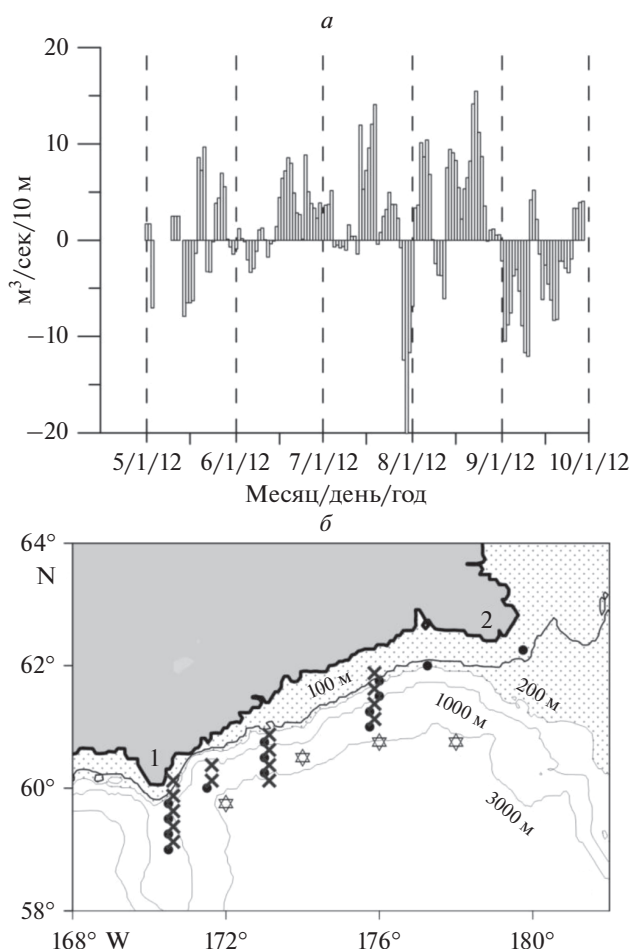


Рис. 3. Временная изменчивость ежедневных значений индекса апвеллинга в период с 5 мая по 1 октября 2012 г. (а) и положение узлов расчетной сетки (б). Условные обозначения: 1 – мыс Олюторский; 2 – мыс Наварин. Шестиугольными звездочками показано положение точек, по которым рассчитывались ежедневные значения индекса апвеллинга (скаттерометр ASCAT), крестиками и точками показано положение узлов расчетной сетки, для которых были получены среднемесячные значения индекса апвеллинга в 2000–2009 гг. (скаттерометр SeaWinds) и 2010–2020 гг. (скаттерометр ASCAT).

отчетливо проявлялся на спутниковых изображениях, полученных в инфракрасном диапазоне спектра (рис. 1 и 2). Достаточно продолжительное и интенсивное событие даунвеллинга было зарегистрировано в период с 1 по 4 августа. На синоптическом масштабе изменчивости при последовательной смене событий апвеллинга и даунвеллинга наблюдается усиление адвекции холодных вод в направлении от берега поперек шельфа (Send et al., 1987). Это существенно увеличивает площадь зоны, находящейся под прямым влиянием апвеллинга. В мае-первой половине июня в этом районе наблюдалось последовательное чередование малоинтенсивных и непродолжитель-

ных по времени эпизодов с благоприятными и неблагоприятными для развития апвеллинга ветровыми условиями. В сентябре над северо-западной частью Берингова моря преобладали ветра с хорошо выраженной северо-западной составляющей. За этот период было зарегистрировано только два случая относительно слабого апвеллинга.

В целом, результаты расчета индекса апвеллинга и спутниковые данные о распределении ТПМ хорошо соответствуют друг другу. По данным скаттерометра ASCAT сезон активного апвеллинга продолжался в середины июня по начало сентября. На инфракрасных изображениях, полученных при помощи спектрометра MODIS Aqua и термическом снимке со спутника Landsat-7 апвеллинг у Корякского побережья наблюдался с начала июля по начало сентября 2012 г. Таким образом, в этот период времени прибрежный апвеллинг можно рассматривать как постоянное и устойчивое явление, определяющее термическую структуру вод шельфовой зоны у Корякского побережья.

СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВЕТРОВОГО АПВЕЛЛИНГА У КОРЯКСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ

В качестве количественного критерия, позволяющего исследовать сезонную изменчивость апвеллинга обычно используются среднемесячные значения индекса апвеллинга. Среднемесячное осреднение ежедневных спутниковых данных о приводном ветре позволяет определить периоды времени, в течении которых преобладали благоприятные для развития апвеллинга ветровые условия. Результаты расчета среднемесячных значений индекса апвеллинга (рис. 4), выполненных по данным о касательном напряжении ветра (скаттерометр SeaWinds – рис. 4, а, скаттерометр ASCAT – рис. 4, б, положение узлов расчетной сетки показано на рис. 3, б) показали, что наиболее благоприятные условия для развития апвеллинга у Корякского побережья существуют в летний период (июнь, июль и август).

В холодную половину года у Корякского побережья наблюдается лед. На сайте Национального центра по исследованию снега и льда США (<https://nsidc.org/>) представлена информация о среднем (медианном) положении кромки льда в Беринговом море, полученная на основе анализа спутниковой информации. Сведения о ледовых условиях и основных параметрах ледяного покрова приводятся в работе (Якунин, 2012). При средних условиях лед у Корякского побережья наблюдается в период с ноября по май. В мае ледовый покров сохраняется только в северной части корякского шельфа у м. Наварин. Летний ветровой апвеллинг у корякского побережья имеет сезонный характер и наблюдается в летний период

(июнь—август). В мае, сентябре и октябре при отсутствии ледового покрова у Корякского побережья ветровые условия благоприятны для развития даунвеллинга (отрицательные значения индекса апвеллинга, рис. 4). В холодную половину года у Корякского побережья наблюдается дрейфующий лед. Лед дрейфует вдоль побережья в направлении от м. Наварин к м. Олоторский. Данные судовых океанографических наблюдений и результаты численного моделирования показывают, что у кромки дрейфующего льда может наблюдаться как апвеллинг, так и даунвеллинг (Häkkinen, 1986; Tang, Ikeda, 1989). Апвеллинг в прикромочной зоне происходит при ветре, направленном таким образом, что кромка дрейфующего льда расположена справа (в северном полушарии) от направления действия ветра. Слабый (неустойчивый) даунвеллинг у кромки дрейфующего льда может развиваться при ветрах противоположного направления. Таким образом, присутствие дрейфующего льда существенно влияет на развитие апвеллинга — в свободный ото льда период (лето) апвеллинг у корякского побережья развивается при ветре, имеющем хорошо выраженную юго-восточную составляющую — берег расположен слева от направления ветра. В холодную половину года над северо-западной частью Берингова моря преобладают ветра северного направления, что может создавать благоприятные условия для развития апвеллинга у кромки льда, дрейфующего вдоль корякского побережья (прикромочная зона расположена справа от направления ветра). При моделировании физических процессов в прикромочной зоне льда необходимо рассматривать три основные поверхности раздела (атмосфера—лед, атмосфера—океан и лед—океан), поэтому не удастся получить аналитическое выражение, позволяющее определить тип процесса (подъем или опускание вод) и количественно оценить ожидаемую интенсивность апвеллинга или даунвеллинга по данным о ветровых условиях вблизи кромки дрейфующего льда.

По данным скаттерометра SeaWinds (2000—2009) в летний период (июнь—август) наибольшие значения индекса апвеллинга наблюдались в июле, наименьшие — в августе. Результаты расчета индекса апвеллинга по данным скаттерометра ASCAT (2010—2020) показали, что максимальные значения индекса апвеллинга наблюдались в июне. В августе значения индекса были отрицательными (даунвеллинг). По среднемноголетним значениям август относится к летним месяцам с наименее благоприятными для развития апвеллинга ветровым условиям. В то же время в отдельные годы в августе наблюдался хорошо выраженный апвеллинг (например, в 2012 г., см. предыдущий раздел). Некоторые различия в сезонной изменчивости интенсивности апвеллинга по данным двух скаттерометров свидетельствуют о зна-

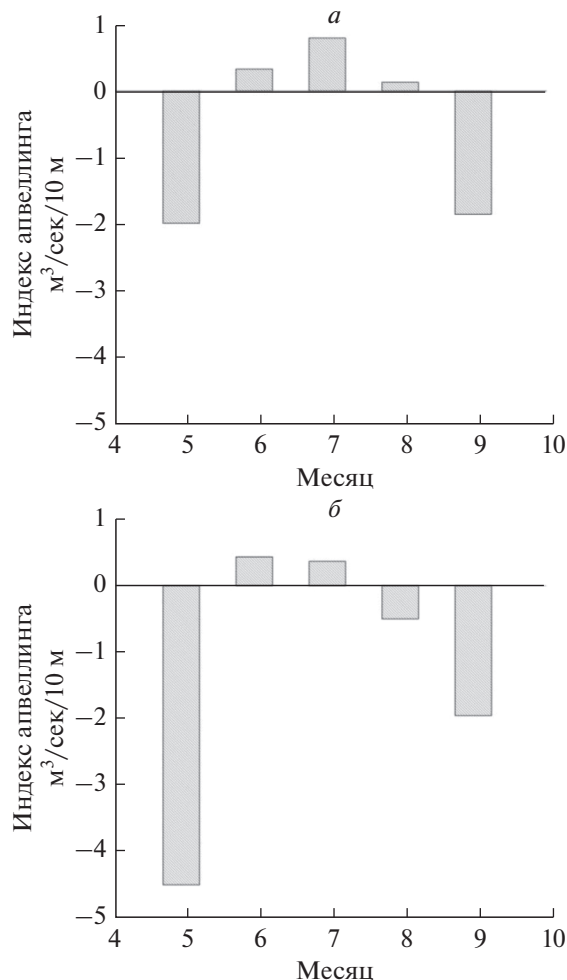


Рис. 4. Среднемесячные значения индекса апвеллинга у Корякского побережья по данным скаттерометров SeaWinds (а) и ASCAT (б).

чительной межгодовой изменчивости этого процесса на Корякском шельфе. Летний подъем вод у Корякского побережья в целом имеет сезонный характер. Однако наиболее интенсивные события апвеллинга и даунвеллинга часто связаны с синоптическим масштабом изменчивости ветровых условий. Поэтому наблюдаемые отличия могут зависеть от преобладающих траекторий движения, интенсивности и повторяемости атмосферных циклонов над северо-западной частью Берингова моря. В августе несколько интенсивных случаев даунвеллинга при меньшей интенсивности событий апвеллинга могут приводить к отрицательным среднемесячным значениям индекса апвеллинга.

Карты пространственного распределения среднемесячных значений индекса апвеллинга в шельфовой зоне, построенные по данным скаттерометра SeaWinds показывают (рис. 5, а–в), что интенсивность и характер процессов апвеллин-

га/даунвеллинга изменяются вдоль Корякского побережья. В летний период центральная часть Корякского шельфа (172° – 175° в.д.) в целом характеризуется благоприятными для развития апвеллинга ветровыми условиями. Отрицательные значения индекса апвеллинга наблюдались в северной части района и на отдельных участках центральной части шельфа. Это показывает, что при средних условиях в период наблюдений (2000–2009) апвеллинг у Корякского побережья определялся не только постоянными ветрами юго-восточного и южного направлений, связанными с летним типом атмосферной циркуляции. Формирование локальных зон даунвеллинга могло быть связано как с устойчивыми внутрисезонными изменениями барического поля, определяемыми положением и интенсивностью региональных центров действия атмосферы, так и следствием синоптической изменчивости ветровых условий в этой части Берингова моря. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен в следующем разделе работы.

Для подтверждения выводов, полученных при анализе сезонной изменчивости ветрового апвеллинга у Корякского побережья по данным спутниковых скаттерометров были использованы среднемесячные карты распределения поверхностной температуры, построенные на основе массива данных многолетних океанографических наблюдений (рис. 6). В июне (рис. 6, а) холодные воды, связанные с апвеллингом ($T < 3.5^{\circ}\text{C}$), наблюдались в шельфовой зоне у Корякского побережья. Воды поверхностного слоя в глубоководной части моря имели температуру около 5°C . Более холодные воды также присутствовали в прибрежном районе, прилегающем к м. Наварин. В июле (рис. 6, б) холодные воды апвеллинга с температурой $< 6^{\circ}\text{C}$ занимали южную и северную части Корякского шельфа. Поверхностные воды с температурой 8 – 10°C наблюдались в глубоководной части моря. В августе (рис. 6, в) температура воды в зоне апвеллинга не превышала 8°C , это привело к уменьшению термических контрастов между прибрежными водами и водами открытой части Берингова моря (9 – 11°C). Результаты, полученные при анализе спутниковой информации в целом хорошо согласуются с среднемесячными океанографическими данными. Среднемесячные климатические поля распределения ТПМ показывают, что в июле апвеллинг оказывает наибольшее влияние на структуру вод корякской шельфовой зоны (рис. 6). Наблюдаемые отличия могут быть связаны с различными временными периодами осреднения данных и неравномерным распределением океанографических станций.

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВЕТРОВОГО АПВЕЛЛИНГА У КОРЯКСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ

Ветровой апвеллинг у Корякского побережья отличается значительной межгодовой изменчивостью. Ветровые условия над Беринговым морем в летний период определяются положением и взаимодействием основных региональных центров действия атмосферы и контрастами температуры между северо-восточной частью Азиатского материка и прилегающими районами океана. К основным барическим образованиям, которые влияют на циркуляцию атмосферы и характер переноса воздушных масс в этом районе относятся летний Азиатский минимум и Северо-тихоокеанский максимум атмосферного давления. При этом отсутствуют значимые корреляционные связи между ветровыми условиями над северо-западной частью Берингова моря и основными климатическими индексами, характеризующими атмосферную циркуляцию и термическое состояние вод северной части Тихого океана (Ростов и др., 2018). На ветровой режим Берингова моря непосредственное влияние оказывают периферийные участки основных летних центров действия атмосферы – Дальневосточная депрессия, связанная с Азиатским минимумом и северный сектор Северо-тихоокеанского максимума атмосферного давления. При этом Дальневосточная депрессия рассматривается как летний региональный центр действия атмосферы, оказывающий непосредственное влияние на северо-западную часть Берингова моря.

Межгодовая изменчивость индекса апвеллинга в летний период (2010–2020), рассчитанная по данным скаттерометра ASCAT, показана на рис. 7. Положение точек, по которым рассчитывалось среднее для каждого месяца значение индекса апвеллинга, представлено на рис. 3, б. Индексы апвеллинга, рассчитанные по среднемесячным спутниковым данным позволяют выделить месяцы, в течение которых преобладали благоприятные или неблагоприятные для развития апвеллинга ветровые условия. На рис. 7 видно, что у Корякского побережья в июне, июле и августе наблюдалось чередование относительно слабых и интенсивных периодов апвеллинга и даунвеллинга. В июне относительно высокие значения индекса (сильный апвеллинг) были получены для периода с 2012 по 2015 гг. В июле также преобладали годы с положительными значениями индекса апвеллинга. В августе при двух случаях интенсивного апвеллинга (2012 и 2017 гг.) ветровые условия у Корякского побережья были более благоприятными для развития даунвеллинга. Характер межгодовой изменчивости индекса апвеллинга в летние месяцы определяет сезонные изменения этого параметра. По данным скаттерометра

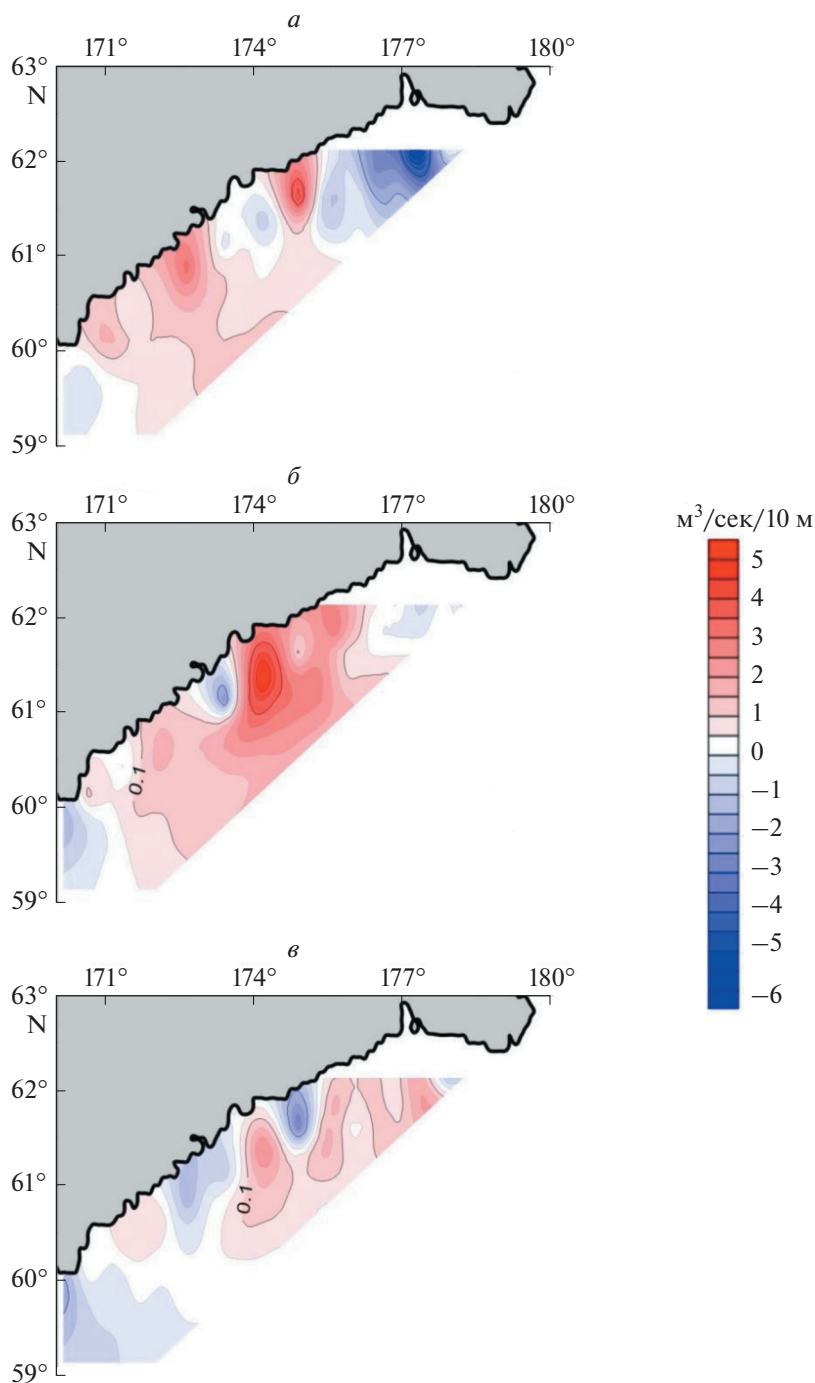


Рис. 5. Пространственное распределение средних значений индекса апвеллинга у Корякского побережья по данным скаттерометра SeaWinds в июне (*а*), июле (*б*) и августе 2000–2009 гг.

ASCAT (рис. 4, *б*) среднее значение индекса апвеллинга в августе за весь рассматриваемый период (2010–2020) было отрицательным. Наиболее благоприятные для развития апвеллинга ветровые условия у Корякского побережья наблюдались в июне 2015 г., июле 2014 г. и в августе 2012 г. Сильный даунвеллинг в этом районе отмечен в июне 2018 г., июле 2015 г. и в августе 2019 г. В це-

лом летний сезон в период с 2010 по 2020 гг. отличался ветровыми условиями, благоприятными для развития апвеллинга (рис. 7, *з*).

Один из основных типов летней атмосферной циркуляции над северо-западной частью Берингова моря формируется под воздействием Дальневосточной депрессии, которая располагается

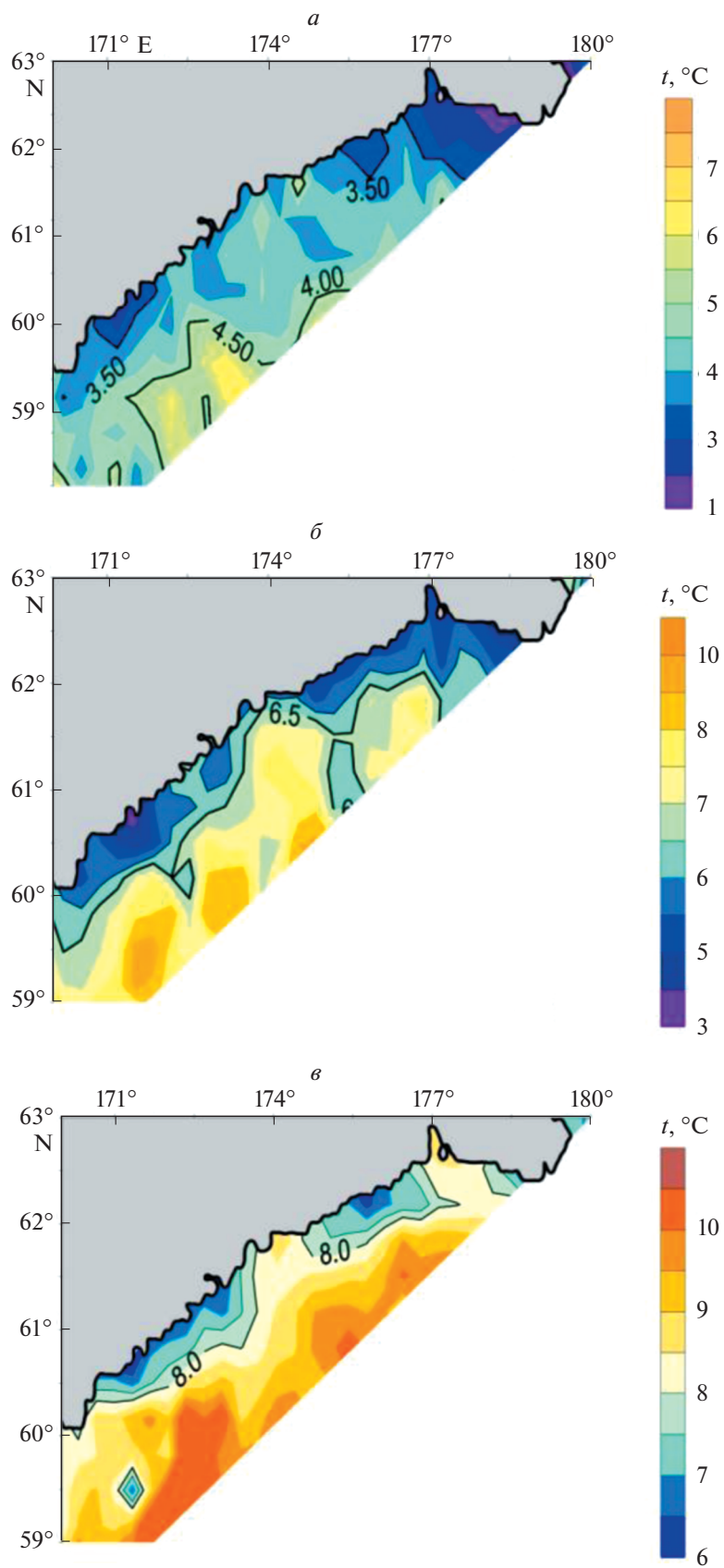


Рис. 6. Среднегодовое распределение температуры поверхности моря в северо-западной части Берингового моря в июне (*a*), июле (*б*) и августе (*в*).

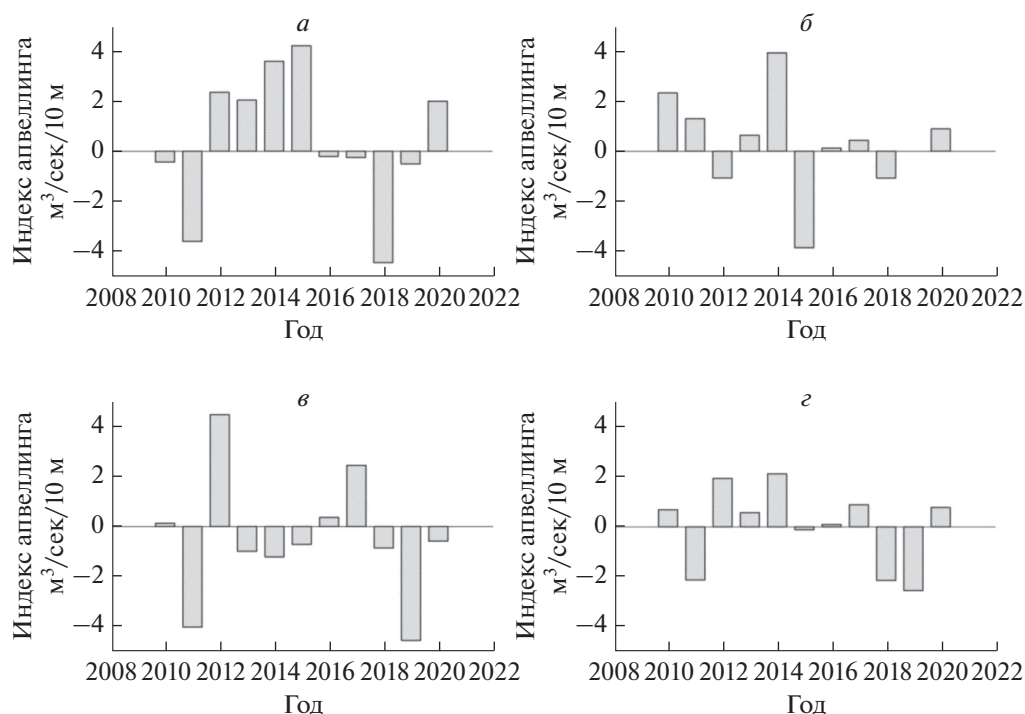


Рис. 7. Распределение среднемесячных значений индекса апвеллинга по данным скаттерометра ASCAT в период с 2010 по 2020 гг. в июне (а), июле (б), августе (в) и в летний период (июнь-август) (з).

над континентальными районами северо-восточной Азии и влияет на акваторию моря передним участком своей ложбины пониженного давления. В районе, расположенном между Корякским нагорьем и северо-западной частью Берингова моря, Дальневосточная депрессия взаимодействует с северным гребнем Северо-тихоокеанского максимума атмосферного давления. При усилении Дальневосточной депрессии над Беринговым морем преобладает ветровой перенос южного направления. Этот тип атмосферной циркуляции характеризуется как летний муссонный (Глебова, 2007). С основным летним типом атмосферной циркуляции связано преобладание ветров юго-западного, южного и юго-восточного направлений (повторяемость 30–60%, средняя скорость в западной части моря 4–6 м/с (Берингово море. Гидрометеорологические условия, 1999), которые создают благоприятные условия для развития апвеллинга у Корякского побережья.

На рис. 8, а, б показано среднемесячное поле приземного атмосферного давления (август 2012 г., реанализ NCEP) и пространственное распределение векторов приводного ветра (скаттерометр ASCAT) в районе, прилегающим к Корякскому побережью. В августе 2012 г. у Корякского побережья наблюдается интенсивный апвеллинг (близкие к экстремальным положительные значения индекса апвеллинга, рис. 7, в). На карте видно (рис. 8, а), что между хорошо развитой Дальневосточной де-

прессией (низкие значения атмосферного давления) и северо-восточным гребнем Северо-тихоокеанского антициклона (область высокого давления) сформировалась высокоградиентное барическое поле, с которым были связаны ветра юго-восточного направления, благоприятные для развития апвеллинга у Корякского побережья (рис. 6, б). Барические ситуации с высоким положительным значением индекса апвеллинга (июль 2014 г. и июнь 2016 г.) характеризовались подобным типом распределения поверхностного атмосферного давления, связанным с усилением Дальневосточной депрессии. Корякское побережье при этом находилось в градиентной зоне между двумя основными центрами действия атмосферы.

Среднемесячное поле приземного атмосферного давления в районе Берингова моря в августе 2019 г. (случай сильного даунвеллинга, экстремально низкие отрицательные значения индекса апвеллинга, рис. 7, в) представлено на рис. 8, в. На карте распределения приземного давления видно, что барическая ситуация, при которой наблюдался активный даунвеллинг, существенно отличается от случая с интенсивным апвеллингом (август 2012 г., рис. 8, а). Эти отличия проявляются в отсутствии развитой Дальневосточной депрессии и формировании другого локального минимума атмосферного давления, также связанного с Азиатской депрессией. Локальное ядро низкого давления было расположено в районе

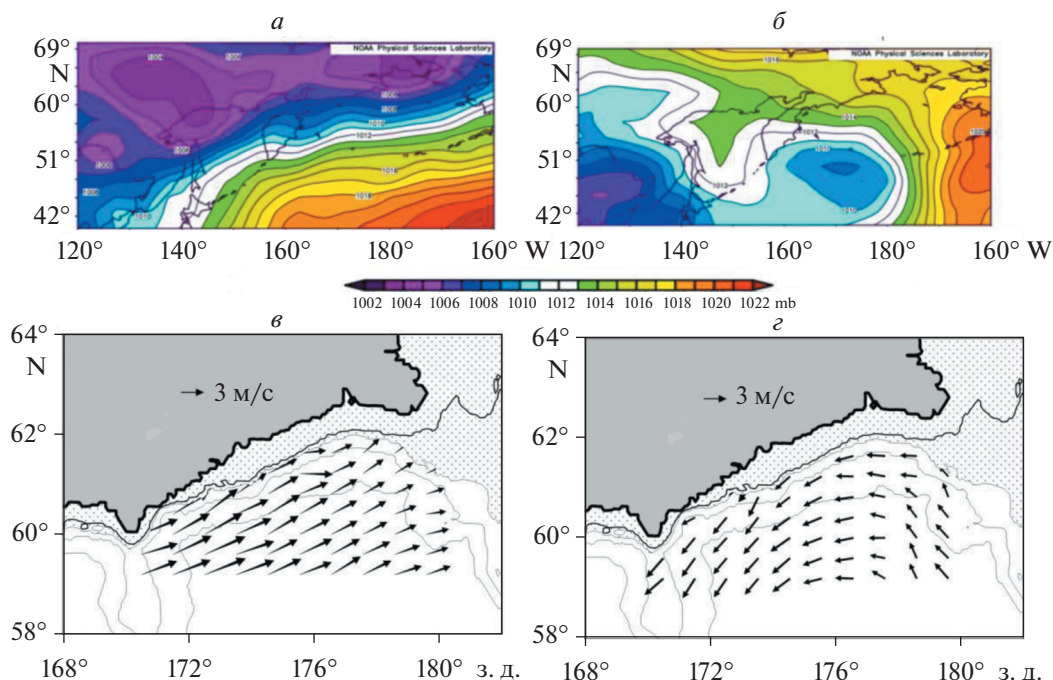


Рис. 8. Поля приземного атмосферного давления над района Берингова моря (*а* – август 2012 г, *в* – август 2019 г) и распределение векторов приводного ветра у Корякского побережья по данным скаттерометра ASCAT в августе 2012 г. (*б*) и в августе 2019 г. (*г*).

Алеутских островов. Формирование этого минимума привело к существенной перестройке барического поля над Беринговым морем. В этом случае высокоградиентная зона в барическом поле формировалась между локальным минимумом атмосферного давления, который оказывал влияние на Берингово море и зоной повышенного давления, расположенной в северо-западной части моря и связанной с гребнем Северо-тихоокеанского максимума. При такой барической ситуации над северной частью моря преобладали ветра западного направления, которые при подходе к Корякскому побережью меняли направление на северо-западное. Таким образом, над Корякским шельфом наблюдался северо-западный ветер, который создавал условия для развития даунвеллинга у побережья (рис. 8, *г*). Ситуации с отделившимся от континентальной ложбины Азиатского минимума изолированным ядром пониженного давления наблюдались в июле 2015 г. и июне 2018 г. при высоких отрицательных значениях индекса апвеллинга у Корякского побережья. При этом центр квазистационарного циклонического образования размещался непосредственно в пределах Берингова моря. Северо-западный ветровой перенос у Корякского побережья в этих двух случаях был связан с северо-восточной периферией этого локального центра пониженного давления.

Межгодовая изменчивость апвеллинга в основном определяется положением и интенсивно-

стью Дальневосточной депрессии как основного регионального центра действия атмосферы, влияющего на ветровой режим Берингова моря. В годы с хорошо развитой Дальневосточной депрессией наблюдалась тенденция к усилению апвеллинга у Корякского побережья, а в годы со слабо выраженной ложбиной пониженного атмосферного давления интенсивность апвеллинга заметно уменьшалась. Усиление даунвеллинга на Корякском шельфе связано с другим локальным ядром пониженного давления, которое может быть расположено как в районе Алеутских островов, так и в пределах Берингова моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетние данные спутниковых наблюдений за ветром (скаттерометры SeaWinds/QuikSCAT и ASCAT/MetOp-A) и спутниковые изображения в инфракрасном диапазоне (MODIS Aqua и Landsat-7) показали, что в северо-западной части Берингова моря у Корякского побережья в летний период наблюдается ветровой апвеллинг. Результаты, полученные при анализе результатов дистанционного зондирования, хорошо согласуются со среднемноголетним (климатическим) распределением ТПМ, полученным по данными океанографических наблюдений. Это показывает, что апвеллинг на Корякском шельфе относится к региональным климатическим факторам,

определяющим формирование летней термической и динамической структуры вод в этом районе.

Ширина зоны прибрежного апвеллинга с пониженными значениями ТПМ составляет от 15 до ~100 км. На синоптическом масштабе изменчивости ветровых условий наблюдалась последовательная имена событий апвеллинга и даунвеллинга. Анализ сезонной изменчивости индекса апвеллинга показал, что ветровой апвеллинг у Корякского побережья развивается в период с июня по август. Наименее благоприятные ветровые условия для развития апвеллинга наблюдаются в августе. Различия в продолжительности сезона летнего апвеллинга связаны с региональными особенностями ветрового режима северо-западной части Берингова моря. Межгодовая изменчивость апвеллинга в основном определяется положением и интенсивностью Дальневосточной депрессии (региональный центр действия атмосферы). В годы с хорошо развитой Дальневосточной депрессией наблюдалась устойчивая тенденция к усилению апвеллинга у Корякского побережья. Даунвеллинг в прибрежной зоне был связан с барическими ситуациями, при которых над Беринговым морем формировалось локальное ядро пониженного атмосферного давления, связанное с периферией крупномасштабного летнего Азиатского минимума.

Таким образом, в шельфовой зоне, прилегающей к Корякскому побережью, в летний период наблюдается ветровой апвеллинг. Прибрежный апвеллинг определяет высокую биологическую продуктивность Корякского шельфа. С другой стороны, апвеллинг приводит к уменьшению температуры воды и возникновению туманов, что оказывает отрицательное влияние на региональные климатические условия.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнялись в рамках госзадания ТОИ ДВО РАН по теме № 6 рег. № 121021700346-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев А.Г.* Циркуляция вод в северо-западной части Берингова моря по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 4. С. 40–47.
- Басюк Е.О., Кивва К.К., Чульчиков Д.Н.* Экстремально холодное термическое состояние вод Берингова моря в 2012 г. // Вопросы промысловой океанологии. Вып. 9. № 1. М.: Из-во ВНИРО. 2012. С. 13–24.
- Боуден К.* Физическая океанография прибрежных вод // М.: Мир. 1988. 324 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 10. Берингово море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Под ред. Терзиева Ф.С. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. 298 с.
- Глебова С.Ю.* Особенности развития атмосферных процессов над Беринговым морем в 2000–2006 гг. // Изв. ТИНРО. 2007. Т. 151. С. 271–289.
- Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Воронцов А.А.* Тенденции климатических изменений термических условий в прибрежных акваториях западной части Берингова моря и прилегающих районах за последние десятилетия // Изв. ТИНРО. 2018. Т. 193. С. 167–182.
- Якунин Л.П.* Атлас основных параметров ледяного покрова Берингова моря // Владивосток: Издательский дом ДВФУ. 2012. 84 с.
- Alvarez I., Gomes-Gesteria M., deCastro M., Novoa E.M.* Ekman transport along the Galician Coast (NW, Spain) calculated from QuikSCAT Winds // J. Mar. Syst. 2008. V. 72. P. 101–115.
- Bakun A.* Coastal upwelling indices, west coast of North America // NOAA Technical Report NMF 671. 1973. 103 p.
- Bentamy A.* Characterization of ASCAT measurements based on buoy and QuikSCAT wind vector observations // Ocean Sci. Discuss. 2008. V. 5. P. 77–101.
- Bentamy A., Grodsky S.A., Carton J.A., Croizé-Fillon D., Chapron B.* Matching ASCAT and QuikSCAT winds // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. C02011. <https://doi.org/10.1029/2011JC007479>
- Freilich M.N., Dunbar R.S.* The accuracy of the NSCAT 1 vector winds: Comparisons with National Data Buoy Center buoys // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 11.231–11.246.
- Häkkinen S.* Coupled ice-ocean dynamics in the marginal ice zones: Upwelling/downwelling and eddy generation // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. (C1). P. 819–832.
- Kivva K., Chulchekov D.* Evidence of local upwellings in the north-western Bering Sea in 2012 // Book-of-abstracts PICES-2013. PICES 2013 Annual Meeting October 11–20, 2013. Nanaimo, BC, Canada. P. 163. (PICES 2013 Annual Meeting presentations: <https://meetings.pices.int/publications/presentations/PICES-2013/2013-POC/POC-0925-Kivva.pdf>).
- Ramanantsoa J.D., Kruga M., Penvend P., Rouault M., Gulad J.* Coastal upwelling south of Madagascar: Temporal and spatial variability // J. Mar. Syst. 2018. V. 178. P. 29–37.
- Send U., Beardsley R.C., Winant C.D.* Relaxation from upwelling in the Coastal Ocean Dynamic Experiment // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. № C2. P. 1683–1698.
- Smith R. L.* Upwelling // Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev. 1968. V. 6. P. 11–46.
- Sverdrup H.U., Johnson M.W., Fleming R.H.* The Oceans. their physics, chemistry, and general biology. New York : Prentice-Hall, Inc. 1942. 1087 p.
- Tang C.L., Ikeda M.* Ice-edge upwelling off the Newfoundland coast during LIMEX // Atmosphere-ocean. 1989. V. 27. № 4. P. 658–681.
- Wang J., Hu H., Mizobata K., Saitoh S.* Seasonal variations of sea ice and ocean circulation in the Bering Sea: A model-data fusion study // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. № C02011. 24 p. <https://doi.org/10.1029/2008JC004727>

Variability of Wind-Driven Upwelling along Koryak Coast in the North-Western Bering Sea Based on the Satellite Data

I. A. Zhabin¹, E. V. Dmitrieva¹, V. A. Dubina¹, and V. A. Luchin¹

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

The variability of upwelling along the Koryak coast in the north-western Bering Sea has been investigated using wind data from QuikSCAT/SeaWinds (2000–2009) and ASCAT/MetOp-A (2010–2020) scatterometers. The strength of upwelling can be estimated based on the wind speed and the wind induced offshore Ekman mass transport (upwelling index). The results indicate that the upwelling that occurred along the Koryak coast was primarily driven by the southerly summer winds over the Bering Sea. The Koryak coastal upwelling occurs mainly during June–August with significant interannual variability. The variability of the upwelling is primarily driven by regional wind forcing. Seasonal variability of southerly winds favorable for upwelling development largely depends on the state of the summer Far Eastern depression (a regional atmospheric center of low pressure associated with a large-scale summer Asia Low). Changes in the pressure field correlate well with the successive alternation of upwelling and downwelling processes near the Koryak coast. Intense upwelling is associated with a well-developed Far Eastern depression. Upwelling can be replaced by downwelling when this regional center of atmospheric action is weakened.

Keywords: wind-driven upwelling, synoptical, seasonal and interannual variability, QuikSCAT/SeaWinds and ASCAT/ MetOp-A scatterometer wind data, upwelling index, summer type of atmospheric circulation, Far Eastern Depression, North-Western Bering Sea, Koryak shelf

REFERENCES

- Alvarez I., Gomes-Gesteria M., deCastro M., Novoa E.M. Ekman transport along the Galician Coast (NW, Spain) calculated from QuikSCAT Winds // *J. Mar. Syst.* 2008. V. 72. P. 101–115.
- Andreev A.G. Tsirkulyatsiya vod v severo-zapadnoy chasti Beringova morya po sputnikovym dannym [Water circulation in the north-western Bering sea studied by satellite data] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2019. № 4. P. 40–47. (In Russian).
- Bakun A. Coastal upwelling indices, west coast of North America // NOAA Technical Report NMF 671. 1973. 103 p.
- Basyuk Ye. O., Kivva K.K., Chul'chekov D.N. Ekstremal'no kholodnoye termicheskoye sostoyaniye vod Beringova morya v 2012 g. [Extremely cold thermal state of the waters of the Bering Sea in 2012] // *Voprosy promyslovy okeanologii*. Issue 9. № 1. M.: Iz-vo VNIRO. 2012. P. 13–24. (In Russian).
- Bentamy A. Characterization of ASCAT measurements based on buoy and QuikSCAT wind vector observations // *Ocean Sci. Discuss.* 2008. V. 5. P. 77–101.
- Bentamy A., Grodsky S.A., Carton J.A., Croizé-Fillon D., Chapron B. Matching ASCAT and QuikSCAT winds // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. C02011. <https://doi.org/10.1029/2011JC007479>
- Beringovo more. Gidrometeorologicheskie usloviya [The Bering Sea. Hydrometeorological conditions]. V. 10. Iss. 1. Ed.: Terziev F.S. Gidrometeoizdat. Sankt-Peterburg. 1999. 298 p. (In Russian).
- Bowden K.F. Physical oceanography of coastal waters // E. Horwood. New York: Halsted Press. 1983. 302 p.
- Freilich M.N., Dunbar R.S. The accuracy of the NSCAT 1 vector winds: Comparisons with National Data Buoy Center buoys // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 11.231–11.246.
- Glebova S.Yu. Osobennosti razvitiya atmosferykh protsessov nad Beringovym morem v 2000–2006 gg. [Features of the of atmospheric processes development over the Bering Sea in 2000–2006] // *Izvestiya TINRO*. 2007. V. 151. P. 271–289. (In Russian).
- Häkkinen S. Coupled ice-ocean dynamics in the marginal ice zones: Upwelling/downwelling and eddy generation // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. (C1). P. 819–832.
- Kivva K., Chulchekov D. Evidence of local upwellings in the north-western Bering Sea in 2012 // Book-of-abstracts PICES-2013. PICES 2013 Annual Meeting October 11–20, 2013. Nanaimo, BC, Canada. P. 163. (PICES 2013 Annual Meeting presentations: <https://meetings.pices.int/publications/presentations/PICES-2013/2013-POC/POC-0925-Kivva.pdf>).
- Ramanantsoa J.D., Kruga M., Penvend P., Rouault M., Gulad J. Coastal upwelling south of Madagascar: Temporal and spatial variability // *J. Mar. Syst.* 2018. V. 178. P. 29–37.
- Rostov I.D., Dmitrieva E.V., Vorontsov A.A. Tendentsii klimaticheskikh izmeneniy termicheskikh usloviy v pribrezhnykh akvatoriyakh zapadnoy chasti Beringova morya i prilgayushchikh rayonakh za poslednie desyatletiya [Tendencies of climate changes for thermal conditions in the coastal waters of the western Bering Sea and adjacent areas in the last decades] // *Izvestiya TINRO*. 2018. V. 193. P. 167–182. (In Russian).
- Send U., Beardsley R.C., Winant C.D. Relaxation from upwelling in the Coastal Ocean Dynamic Experiment // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92. № C2. P. 1683–1698.
- Smith R.L. Upwelling // *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.* 1968. V. 6. P. 11–46.
- Sverdrup H.U., Johnson M.W., Fleming R.H. The Oceans. their physics, chemistry, and general biology. New York : Prentice-Hall, Inc. 1942. 1087 p.
- Tang C.L., Ikeda M. Ice-edge upwelling off the Newfoundland coast during LIMEX // *Atmosphere-ocean*. 1989. V. 27. № 4. P. 658–681.
- Wang J., Hu H., Mizobata K., Saitoh S. Seasonal variations of sea ice and ocean circulation in the Bering Sea: A model-data fusion study // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. № C02011. 24 p. <https://doi.org/10.1029/2008JC004727>.
- Yakunin L.P. Atlas osnovnykh parametrov ledyanogo pokrova Beringova Morya [Atlas of the main parameters of the Bering Sea ice cover] // Vladivostok: Izdatel'skiy dom DVFU. 2012. 84 p. (In Russian).