

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ЦИРКУЛЯЦИЯ ВОД В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ БЕРИНГОВА МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2019 г. А. Г. Андреев

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, Владивосток

E-mail: andreev@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 07.11.2018 г.

Исследование циркуляции вод в северо-западной части Берингова моря с использованием спутниковых данных по скоростям геострофических течений AVISO в период с 2002 по 2017 гг. показало значительную сезонную изменчивость динамики поверхностных вод. В январе основной поток поверхностных вод направлен на юго-запад вдоль материкового склона, а на шельфе наблюдается антициклональное движение вод. В июле поток поверхностных вод ориентирован на северо-восток вдоль материкового склона, а на шельфе преобладает циклональное движение вод. Образование мезомасштабных антициклонов в зимний период обусловлено поступлением шельфовых вод с пониженной температурой и соленостью. Временная изменчивость направления и скорости течений в летний период связана с прибрежным апвеллингом, вызываемым ветрами южных румбов над западной частью Берингова моря. Наличие апвеллинга и вихрей следует рассматривать как один из факторов, приводящих к образованию области с высокой концентрацией хлорофилла вблизи побережья в летний сезон.

Ключевые слова: антициклоны, апвеллинг, Берингово море, сезонная и межгодовая изменчивость, спутниковые данные, течения

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019440-47>

ВВЕДЕНИЕ

Согласно общепринятой схеме циркуляции вод (Гидрометеорология, 1999; Stabeno, Reed, 1994), в глубоководной части Берингова моря преобладает циклоническое движение вод (рис. 1а). На юге выделяют направленное на восток Северо-Алеутское склоновое течение, инициируемое затоком тихоокеанских вод через проливы Алеутской гряды. Продолжением Северо-Алеутского склонового течения является Берингоморское склоновое (или Поперечное) течение, пересекающее центральную часть Берингова моря с юго-востока на северо-запад. Вблизи м. Наварин Берингоморское склонное течение разделяется на две ветви. Одна, направленная на северо-восток в сторону Берингова пролива образует Наваринское течение. Другая ветвь, направленная на юго-запад, дает начало Восточно-Камчатскому течению. Мезомасштабные вихри, расположенные вдоль материкового склона, оказывают значительное влияние на направление и интенсивность переноса вод в Беринговом море. Вихри усиливают обмен биогенными элементами и планктоном между шельфом и глубоководной котловиной и воздействуют на пространственное распределение концентрации хлорофилла (Сапожников, 1993; Okkonen et al., 2004; Mizobata et al., 2006).

К основным процессам, определяющим продуктивность прибрежных районов морей и океанов, относится ветровой апвеллинг. Прибрежный апвеллинг вызывается ветром, дующим параллельно берегу таким образом, что берег остается слева в Северном полушарии. В период летнего муссона благоприятные условия для развития устойчивого прибрежного апвеллинга в Беринговом море наблюдаются у восточного побережья материка (в западной части Берингова моря), которое расположено слева от направления преобладающих ветров южных румбов. Апвеллинг и связанный с этим явлением подъем вод сопровождается поступлением в поверхностный слой большого количества биогенных элементов, что обеспечивает высокий уровень первичной продукции, которая является основой пищевой цепи в морских экосистемах.

Исследование динамики вод в северо-западной части Берингова моря в основном основывается на результатах судовых STD наблюдений, проводимых в теплое время года с низким пространственным и временным разрешением (Басюк и др. 2007; Хен, Заволокин, 2015). Поэтому использование данных спутниковых наблюдений с высоким пространственным и временным разрешением может существенно улучшить наше понимание сезонных и межгодовых изменений циркуляции вод в данном регионе

и выяснить причины, вызывающие данные изменения. Цель данной работы — исследовать динамику вод в северо-западной части Берингова моря с привлечением спутниковых данных и выявить связь между циркуляцией вод и ветровым режимом. Показать влияние динамики вод на распределение концентрации хлорофилла. Важность данного исследования определяется высокой биологической продуктивностью вод и активной добычей биоресурсов в данном регионе (Гидрометеорология..., 2001).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наши исследования основываются на информации по уровню моря и скоростям геострофических течений с пространственным разрешением $1/4$ град на $1/4$ град (для исследуемого района: ~ 30 км по долготе и ~ 15 км по широте), полученной по данным спутниковых измерений (база данных AVISO, <http://www.avis0.altimetry.fr>) за период с 2002 по 2017 гг. Объединенный массив AVISO включает в себя скорректированные альтиметрические данные, полученные со спутников Cryosat-2, Jason-1, Jason-2, Envisat, TOPEX/Poseidon, GFO-1, ERS-1 и ERS-2. Для коррекции альтиметрических данных в центре AVISO применяется глобальная приливная модель GOT4.7. Поправки на изменения уровня моря, вызванные изменением атмосферного давления, рассчитываются по уравнению обратного барометра. При расчете геострофических течений используется средняя динамическая топография океана MDT CNES-CLS-09. Величина ошибки спутниковых данных AVISO по уровню моря (SSH), полученных в период с 2002 г. по настоящее время, составляет 1–2 см на расстоянии превышающем 20–40 км от берега (Ablain et al., 2015). Исходя из принятой величины ошибки SSH, ошибка рассчитанных скоростей геострофических течений для исследуемого района составляет 3–6 см/с.

При исследовании пространственно-временной изменчивости температуры поверхностных вод (SST) использованы спутниковые данные, полученные с ИСЗ Aqua с пространственным разрешением 4 км (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>). В работе приводятся данные буев Арго (вертикальные профили температуры и солености), предоставленные Национальным информационным центром Агентства по исследованию атмосферы и океана (NOAA) (<http://www.nodc.noaa.gov/argo>). Данные по направлению и скоростям ветра и напряжению трения ветра были взяты на сайте Центра диагностики климата (<http://www.esrl.noaa.gov>).

СЕЗОННОСТЬ ЦИРКУЛЯЦИИ ВОД

В связи с муссонным характером атмосферной циркуляции летом над западной частью Берингова моря преобладают ветра южных направлений, а осенью и зимой — ветра северных направлений. Анализ полей скоростей поверхностных течений по данным спутниковой альтиметрии за период с 2002 по 2017 гг. показал, что циркуляция вод в северо-западной части Берингова моря подвержена значительной сезонной изменчивости. Карты течений указывают на преобладание потока вод, направленного на юго-запад вдоль материкового склона в январе и потока вод направленного на северо-восток в июле (рис. 1б, в).

Среднемесячные скорости течений в летний и зимний сезоны подвержены значительной межгодовой изменчивости. Усиление ветров северо-восточных румбов до 11 м/с в феврале 2004 г. и феврале 2005 г. способствовало увеличению скоростей направленного на юго-запад вдоль склонового течения до 18–24 см/с. Ослабление северо-восточных ветров в феврале 2006 г., феврале 2011 г. и январе 2015 г. до 2–3 м/с сопровождалось сменой направления вдоль склонового течения с юго-западного на северо-восточное (скорость течения 3–4 см/с). В теплое время года (июль–август) при преобладании ветров юго-западных румбов (2–4 м/с) среднемесячная скорость направленного на северо-восток вдоль склонового течения составляла 11–19 см/с (июль 2007 г., август 2009 г., август 2012 г., август 2014 г.). Появление северо-восточных ветров (2–3 м/с) над исследуемым районом приводило к значительному ослаблению северо-восточного потока вод вдоль материкового склона (август 2003 г., август 2011 г.) и смене направления течения с северо-восточного на юго-западное (июль 2009 г.).

В холодное и теплое время года на циркуляцию вод в западной части Берингова моря оказывали влияние антициклонические вихри (горизонтальный размер ~ 100 км), расположенные на шельфе (январь) и вблизи материкового склона (июль) (рис. 1б, в). Вертикальные распределения температуры и солености в центре антициклона (60° с.ш., 173.5° в.д.) и вблизи его северо-восточной границы (60° – 61° с.ш., 175° – 176° в.д.) в феврале–марте 2016 г. по данным буя Арго (#4900855) показали, что ядро антициклона (глубины 150–300 м) было образовано водами с пониженной температурой (1°C) и соленостью (33.1 е.п.с.). Формирование ядер антициклонических вихрей вблизи материкового склона в северо-западной части Берингова моря в зимний период происходит за счет поступления вод внешнего шельфа с температурой 1 – 2°C и соленостью 33.0–33.2 е.п.с. (Andreev et al., 2018).

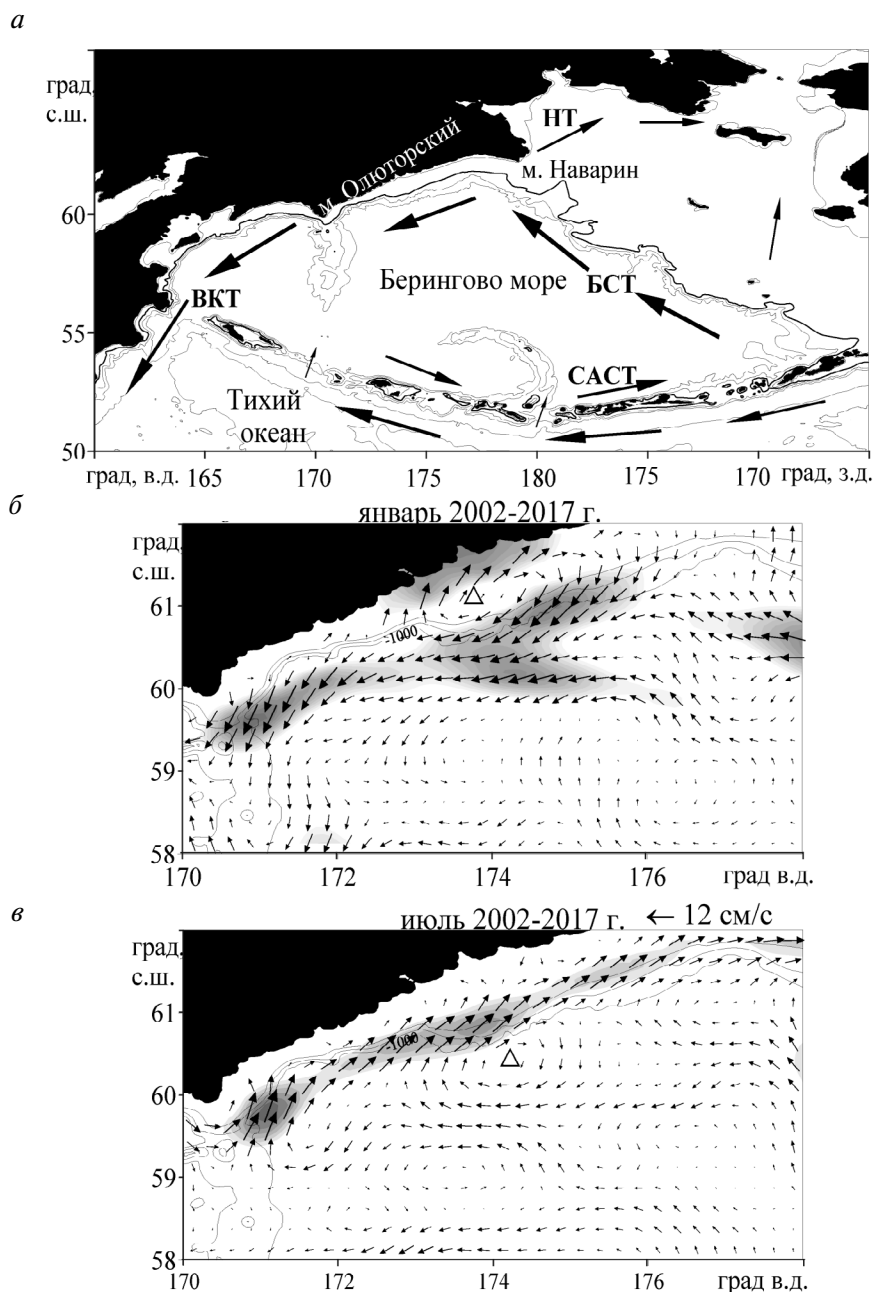


Рис. 1. а — Схема поверхностных течений Берингова моря: БСТ — Берингоморское склоновое течение, ВКТ — Восточно-Камчатское течение, НТ — Наваринское течение, САСТ — Северо-Алеутское Склоновое течение; б, в — поле поверхностных геострофических течений по данным AVISO, Δ — антициклональный вихрь.

ВЛИЯНИЕ ПРИБРЕЖНОГО АПВЕЛЛИНГА НА ГЕОСТРОФИЧЕСКИЕ ТЕЧЕНИЯ, ТЕМПЕРАТУРУ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ВОД И КОНЦЕНТРАЦИЮ ХЛОРОФИЛЛА

Преобладающие летние муссонные ветра южного направления создают благоприятные условия для развития апвеллинга на внешней границе шельфа в западной части Берингова

моря. Термические контрасты на поверхности моря позволяют выделить зону апвеллинга по распределению температуры на поверхности моря, полученной по спутниковым данным (рис. 2а, б). Используя спутниковые снимки SST, полученные со спутника Pathfinder (1985–1996), Belkin и Cornillon (2005) выделили внешнюю границу зоны апвеллинга вблизи северо-западного побережья Берингова моря в качестве термического фронта.

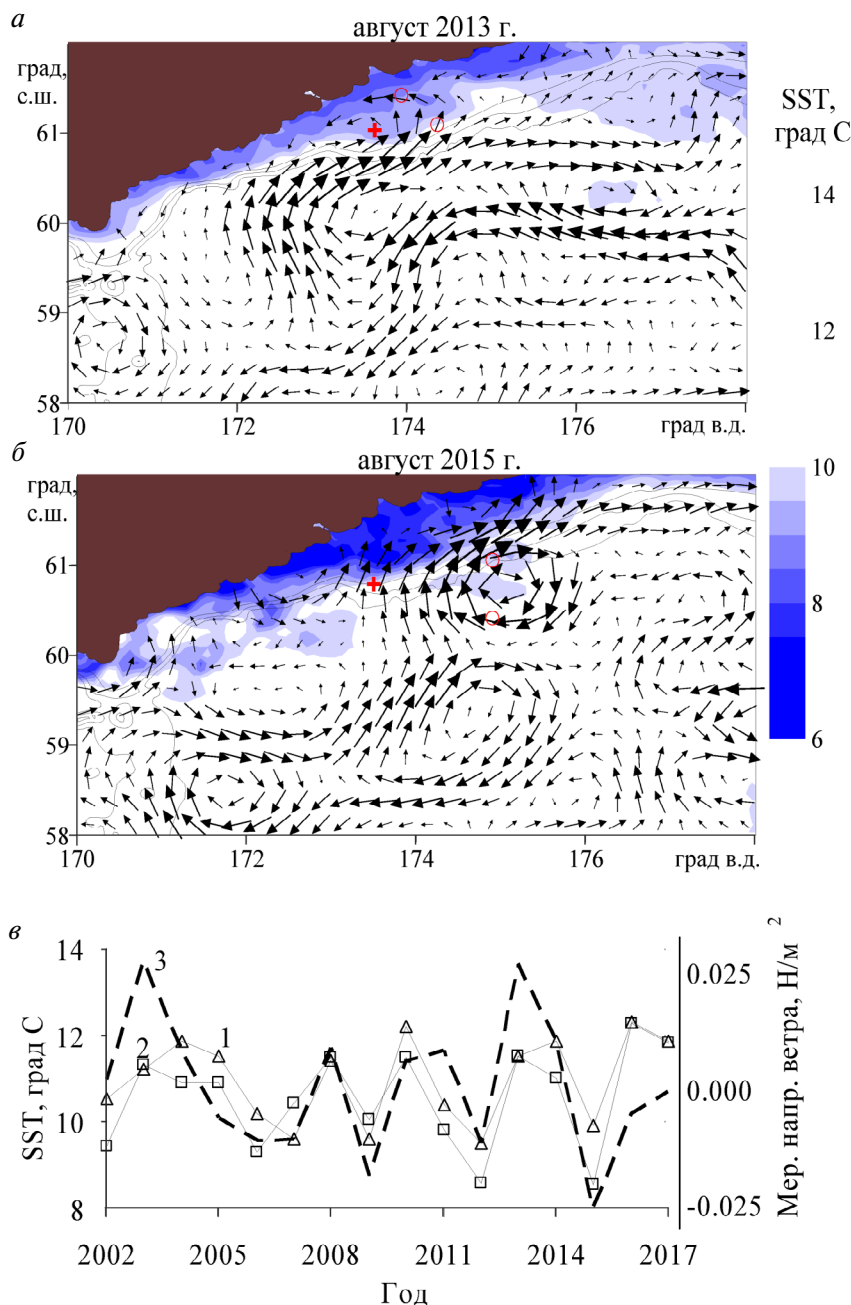


Рис. 2. *a, б* — поле поверхностных геострофических течений по данным AVISO и распределение температура в поверхностном слое вод по данным MODIS/Aqua; *в* — межгодовые изменения среднемесячных (август) температур поверхностного слоя вод (SST) по данным MODIS/Aqua и меридиональной составляющей напряжения трения ветра над западной частью Берингова моря: 1 — SST (60.5° с.ш., 173.2° в.д.), 2 — SST (60.5° с.ш., 172.2° в.д.), 3 — напряжение трения ветра (60° с.ш., 174° в.д.). Крестиками и кружочками на рис. 2*a, б* показаны районы, где исследовалась временная изменчивость уровня моря и скорости геострофического течения, представленные на рис. 3.

Гидрологические данные, полученные в августе 2013 г., позволили рассмотреть особенности термохалинной структуры вод в исследуемом районе в период летнего апвеллинга. Вертикальные распределения температуры и солёности показали выход изотерм и изохалин на поверхность, снижение поверхностной температуры в направлении

к берегу от 9.5 до 7.4 °C и увеличение солёности от 32.4 до 32.7 е.п.с., что характерно для зон прибрежного апвеллинга (Жабин, Дмитриева, 2016; Жабин и др., 2017).

Усиление ветров южных румбов и увеличение меридиональной составляющей напряжения трения ветра (τ_y), вызывающего экмановский

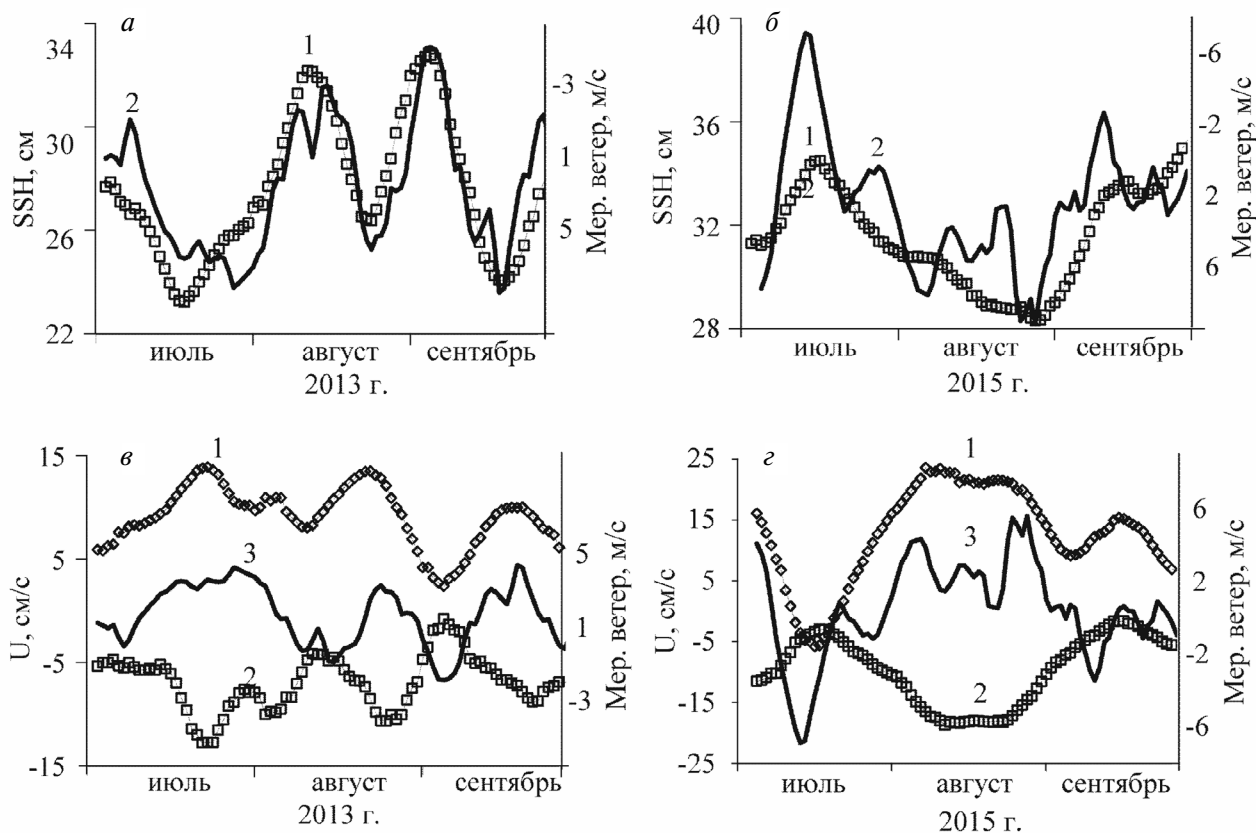


Рис. 3. *a, б* — временная изменчивость уровня моря (SSH) по данным AVISO и меридиональной составляющей скорости ветра (60.0–62.5° с.ш., 172.5–175.0° в.д.): 1 — SSH (*a* — 61.1° с.ш., 173.6° в.д., *б* — 60.6° с.ш., 173.4° в.д.), 2 — скорость ветра; *в, г* — временная изменчивость зональных составляющих геострофических течений по данным AVISO и меридиональных составляющей скорости ветра: 1 — скорость течений (*в* — 60.9° с.ш., 174.4° в.д., *г* — 61.1° с.ш., 174.9° в.д.), 2 — скорость течений (*в* — 61.4° с.ш., 173.9° в.д., *г* — 60.4° с.ш., 174.9° в.д.), 3 — скорость ветра.

перенос ($\tau_y/\rho f$, где ρ — плотность морской воды, f — параметр Кориолиса) шельфовых вод на восток в глубоководную часть Берингова моря и подъему глубинных вод, приводит к понижению SST прибрежных вод в августе (рис. 2*a, б*). Межгодовая изменчивость среднемесячной SST на границе шельфа исследуемого района показывает статистически значимую корреляцию ($r = 0.60$, 2002–2017 гг.) с изменениями меридиональной составляющей напряжения трения ветра (рис. 2*в*), определяющей интенсивность прибрежного апвеллинга. Усиление ветров южных румбов (отрицательные величины меридионального напряжения ветра) в августе 2012 г. и августе 2015 г. сопровождалось снижением среднемесячной SST с 12 °C до 8.5 °C.

Летний апвеллинг оказывал влияние на скорость и направление прибрежных геострофических течений и на интенсивность антициклонических вихрей в исследуемом районе. Усиление ветров южных румбов и подъем глубинных вод с повышенной плотностью сопровождалось понижением SSH в зоне шельфа ($r = 0.81$ для

июля–сентября 2013 г. и $r = 0.78$ для июля–сентября 2015 г.) (рис. 3*a, б*). Увеличение разности SSH, определяющей скорость геострофических течений, между водами глубоководной котловины и прибрежными водами приводило к усилению направленного на северо-восток потока вод вдоль границы шельфа (рис. 3*в*–1) и направленного на юго-запад потока вод вблизи побережья (рис. 3*в*–2) и к возрастанию скоростей течений на северной и южной границе антициклонального вихря с 12 см/с до 20 см/с (рис. 3*г*–1, 2). Временные изменения скоростей течений хорошо согласуются с изменениями скорости ветра над западной частью Берингова моря в июле–сентябре ($r = 0.73$ –0.79). Изменения в скоростях течений не могут быть интерпретированы как баротропный отклик на изменение напряжения трения ветра из-за высокой амплитуды временных вариаций SSH (5–10 см). Вызванное апвеллингом повышение плотности морской воды на 1 кг/м³ ($\Delta\rho$) с 1024.8 кг/м³ до 1025.8 кг/м³ в поверхностном 50 м слое (h) прибрежных вод должно было вызвать снижение SSH ($h \cdot \Delta\rho/\rho$) на 5 см, что согласуется

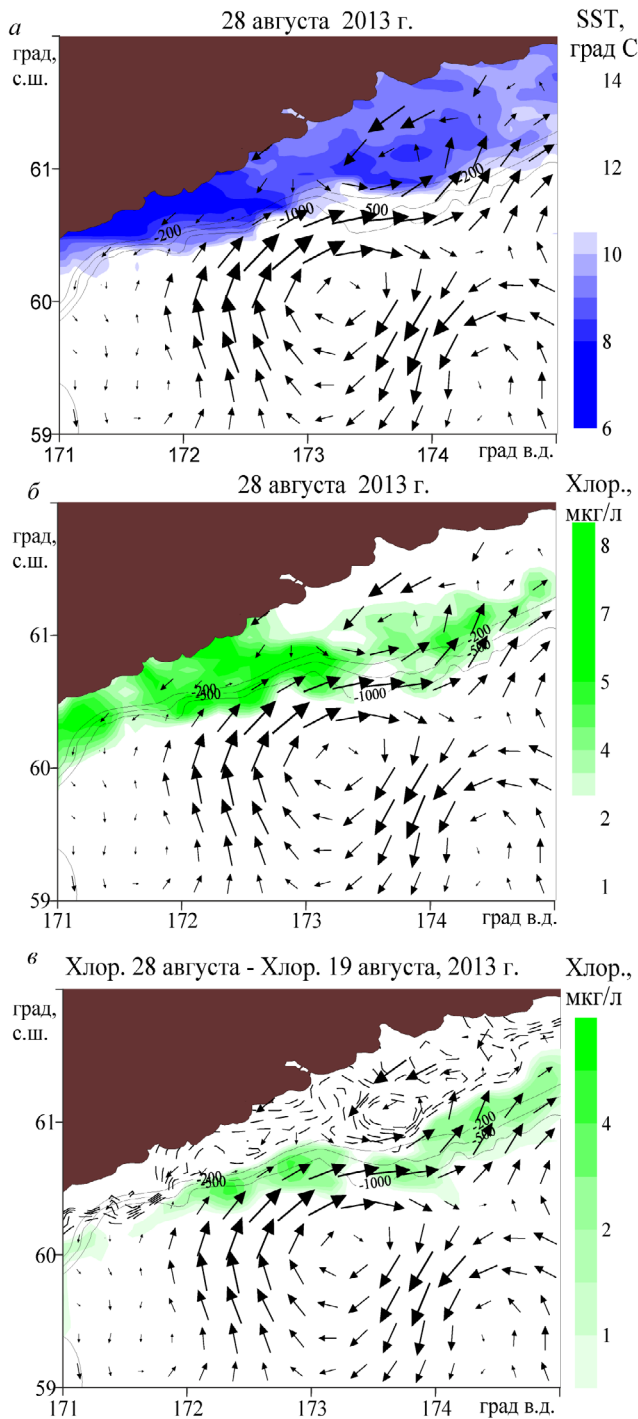


Рис. 4. *а–в* — поле поверхностных геострофических течений по данным AVISO от 28.08.2013, *а, б* — распределение температуры и концентрации хлорофилла в поверхностном слое вод по данным MODIS/Aqua, *в* — разность в концентрациях хлорофилла между 28.08.2013 и 19.08.2013: пунктирной линией показаны величины от -5 до -1 мкг/л с интервалом 1 мкг/л, временная изменчивость уровня моря и скорости геострофического течения, представленные на рис. 3.

наблюдаемым изменениям SSH в июле—сентябре 2013 г. и июле—сентябре 2015 г. (рис. 3*а, б*). Интенсификация антициклонов происходила в периоды усиления ветров южных румбов благоприятных для развития апвеллинга вблизи побережья материка. Подъем изопикнических поверхностей и понижение уровня моря вблизи берега, вызванное экмановским переносом и апвеллингом способствовало появлению потока вод с юга на север вдоль материкового склона (рис. 2*а, б*).

В летний сезон на шельфе наблюдалась мезомасштабная циклоническая циркуляция вод (рис. 4*а, б*), по-видимому, обусловленная прибрежным апвеллингом и наличием антициклональных вихрей вдоль материкового склона. На базе численных экспериментов было установлено, что при полностью развитом прибрежном апвеллинге вдоль береговой бароклинной струи проявляется бароклинную неустойчивость, в результате которой происходит селективная генерация преимущественно циклонических вихрей (Журбас и др., 2004). Нами было показано наличие связи между прибрежным апвеллингом и мезомасштабной циклонической циркуляцией вод вблизи восточного побережья Сахалина (Охотское море), вызываемыми ветрами южных румбов в летний период (Андреев, 2017).

В августе, после прохождения пика весеннего цветения планктона, шельфовые воды обеднены биогенными элементами по сравнению с водами глубоководной части Берингова моря (<https://www.nodc.noaa.gov/OC5/SELECT/woaselect/woaselect.html>). Апвеллинг приводит к поступлению в поверхностный слой вод богатых биогенными элементами глубинных вод, что сопровождается понижением температуры вод (рис. 4*а*) и повышением биомассы автотрофного планктона и концентрации хлорофилла на границе шельфа и в зоне материкового склона (рис. 4*б*). Антициклональные и циклональные вихри способствуют распространению вод с высокой концентрацией хлорофилла вдоль материкового склона. Усиление южных ветров в период с 19 по 28 августа 2013 г. сопровождалось увеличением концентрации хлорофилла в зоне материкового склона (внешняя граница апвеллинга) и его снижением на шельфе (рис. 4*в*).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование циркуляции вод в северо-западной части Берингова моря с использованием спутниковых данных в период с 2002 по 2017 гг. показало значительную сезонную изменчивость динамики поверхностных вод. В январе основной поток

поверхностных вод был направлен на юго-запад вдоль материкового склона, а на шельфе наблюдалась антициклональное движение вод. В июле поток поверхностных вод был ориентирован на северо-восток вдоль материкового склона, а на шельфе преобладало циклональное движение вод. Образование мезомасштабных антициклонов в зимний период было обусловлено поступлением шельфовых вод с пониженной температурой и соленостью. Временная изменчивость течений в летний период связана с прибрежным апвеллингом, вызываемым ветрами южных румбов над западной частью Берингова моря. Наличие апвеллинга и вихрей следует рассматривать как один из факторов, приводящих к образованию области с высокой концентрацией хлорофилла вблизи побережья в летний сезон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев А.Г. Мезомасштабная циркуляция вод в районе Восточно-Сахалинского течения (Охотское море) // Исследование Земли из космоса. 2017. № 2. С. 3–12.
- Басюк Е.О., Хен Г.В., Ванин Н.С. Изменчивость океанологических условий Берингова моря в 2002–2006 гг. // Известия ТИНРО. 2007. Т. 151. С. 290–311.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей. Берингово море. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоздат, 1999. Т. 10. Вып. 1. 299 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей. Берингово море. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности. СПб.: Гидрометеоздат, 2001. Т. 10. Вып. 2. 236 с.
- Жабин И.А., Дмитриева Е.В. Сезонная и межгодовая изменчивость ветрового апвеллинга у восточного побережья о-ва Сахалин по данным скаттерометра SEAWINDS спутника QUIKSCAT // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 105–115.
- Жабин И.А., Дмитриева Е.В., Ванин Н.С. Влияние ветровых и ледовых условий на апвеллинг у западного побережья полуострова Камчатка (Охотское море) по данным спутниковых наблюдений. Исслед. Земли из космоса. 2017. № 3. С. 22–28.
- Журбас В.М., Ступа Т., Малки П., Пака В.Т., Кузьмина Н.П., Скляров В.Е. Мезомасштабная изменчивость апвеллинга в юго-восточной Балтике: ИК-изображения и численное моделирование // Океанология. 2004. Т. 44. № 5. С. 660–669.
- Сапожников В.В. Влияние мезомасштабных антициклонических вихрей на формирование гидрохимической структуры Берингова моря // Океанология. 1993. Т. 33. № 3. С. 347–353.
- Хен Г.В., Заволокин А.В. Перемена в циркуляции вод и ее значение в распределении и обилии лососей в западной части Берингова моря в начале 21-го столетия // Известия ТИНРО. 2015. Т. 181. С. 95–115.
- Ablain M., Cazenave A., Larnicol G. et al. Improved sea level record over the satellite altimetry era (1993–2010) from the Climate Change Initiative project // Ocean Science. 2015. V. 11. P. 67–82.
- Andreev A.G., Budyansky M.V., Uleysky M. Yu., Prants S.V. Mesoscale dynamics and walleye pollock catches in the Navarin Canyon area of the Bering Sea // Ocean dynamics. 2018. № 11. P. 1503–1514.
- Belkin I.M., Cornillon P.C. Bering Sea thermal fronts from Pathfinder data: seasonal and interannual variability // Pacific Oceanography. 2005. V. 2. № 3–4. P. 6–20.
- Mizobata K., Wang J., Saitoh S.-I. Eddy-induced cross-slope exchange maintaining summer high productivity of the Bering Sea shelf break // J. of Geophys. Res.: Oceans. V. 111. 2006. P. C10017. doi:10.1029/2005JC003335
- Okkonen S.R., Schmidt G., Cokelet E., Staben P. Satellite and hydrographic observations of the Bering Sea 'Green Belt' // Deep Sea Res. Part II: Topical Studies in Oceanography. 2004. V. 51. P. 1033–1051. doi:10.1016/s0967-0645(04)00099-2
- Staben P.J., Reed R.K. Circulation in the Bering Sea Basin Observed by Satellite-Tracked Drifters: 1986–1993 // J. of Physical Oceanography. 1994. V. 24. P. 848–854.

Water Circulation in the North-Western Bering Sea Studied by Satellite Data

A. G. Andreev

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok

The surface water circulation in the Bering Sea for the period from 2002 to 2017 has been investigated using satellite data. In January, the main stream of surface waters was directed to the south-west along the continental slope, and anticyclonic water circulation was observed on the shelf. In July, the surface water flow was oriented to the northeast along the continental slope, and on the shelf the cyclonic movement of water prevailed. The formation of mesoscale anticyclones in the winter period was caused by the supply of shelf waters with low temperature and salinity. The temporal variability of the currents during the summer is associated with coastal upwelling caused by the winds of the southern points over the western part of the Bering Sea. The presence of upwelling and anticyclonic eddies should be considered as one of the factors leading to the formation of a region with a high concentration of chlorophyll near the coast in the summer season.

Keywords: anticyclones, Bering Sea, currents, satellite data, seasonal and interannual variability, upwelling

REFERENCES

- Ablain M., Cazenave A., Larnicol G. et al.* Improved sea level record over the satellite altimetry era (1993–2010) from the Climate Change Initiative project // *Ocean Science*. 2015. V. 11. P. 67–82.
- Andreev A.G.* Mezomasshtabnaya tsirkulyatsiya vod v raione Vostochno-Sakhalinskogo techeniya (Okhotskoe more) [Mesoscale water circulation in the East Sakhalin Current (Sea of Okhotsk)] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2017. № 2. P. 3–12. (In Russian).
- Andreev A.G., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu., Prants S.V.* Mesoscale dynamics and walleye pollock catches in the Navarin Canyon area of the Bering Sea // *Ocean dynamics*. 2018. № 11. P. 1503–1514.
- Basyuk E.O., Khen G.V., Vanin N.S.* Izmenchivost' okeanologicheskikh uslovii Beringova morya v 2002–2006 gg. [Variability of the oceanological conditions of the Bering Sea in 2002–2006] // *Izvestiya TINRO*. 2007. V. 151. P. 290–311. (In Russian).
- Belkin I.M., Cornillon P.C.* Bering Sea thermal fronts from Pathfinder data: seasonal and interannual variability // *Pacific Oceanography*. 2005. V. 2. № 3–4. P. 6–20.
- Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei. Beringovo more. Gidrometeorologicheskie usloviya [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. Bering Sea. Hydrometeorological conditions]. SPb.: Gidrometeoizdat, 1999. T. 10. Vyp. 1. 299 p. (In Russian).
- Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei. Beringovo more. Gidrokhimicheskie usloviya i okeanologicheskie osnovy formirovaniya biologicheskoi produktivnosti [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. Bering Sea. Hydrochemical conditions and oceanological basis for the formation of biological productivity]. SPb.: Gidrometeoizdat, 2001. T. 10. Vyp. 2. 236 p. (In Russian).
- Khen G.V., Zavolokin A.V.* Peremena v tsirkulyatsii vod i ee znachenie v raspredelenii i obilii lososei v zapadnoi chasti Beringova morya v nachale 21-go stoletiya [Changes in water circulation and its importance in the distribution and abundance of salmon in the western part of the Bering Sea in the early 21st century] // *Izvestiya TINRO*. 2015. V. 181. P. 95–115. (In Russian).
- Mizobata K., Wang J., Saitoh S.-I.* Eddy-induced cross-slope exchange maintaining summer high productivity of the Bering Sea shelf break // *J. of Geophys. Res.: Oceans*. V. 111. 2006. P. C10017. doi:10.1029/2005JC003335
- Okkonen S.R., Schmidt G., Cokelet E., Stabeno P.* Satellite and hydrographic observations of the Bering Sea 'Green Belt' // *Deep Sea Res. Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2004. V. 51. P. 1033–1051. doi:10.1016/s0967-0645(04)00099-2
- Sapozhnikov V.V.* Vliyanie mezomasshtabnykh antitsiklonicheskikh vikhrei na formirovanie gidrokhimicheskoi struktury Beringova morya [Influence of mesoscale anticyclonic eddies on the formation of the hydrochemical structure of the Bering Sea] // *Okeanologiya*, 1993. V. 33. № 3. P. 347–353. (In Russian).
- Stabeno P.J., Reed R.K.* Circulation in the Bering Sea Basin Observed by Satellite-Tracked Drifters: 1986–1993 // *J. of Physical Oceanography*. 1994. V. 24. P. 848–854.
- Zhabin I.A., Dmitrieva E.V.* Sezonnaya i mezhgodovaya izmenchivost' vetrovogo apvellinga u vostochnogo poberezh'ya o-va Sakhalin po dannym skatterometra SEAWINDS sputnika QUIKSCAT [Seasonal and interannual variability of wind upwelling off the east coast of Sakhalin Island according to the QUIKSCAT satellite SEAWINDS data] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2016. № 1–2. P. 105–115. (In Russian).
- Zhabin I.A., Dmitrieva E.V., Vanin N.S.* Vliyanie vetrovykh i ledovykh uslovii na apvellling u zapadnogo poberezh'ya poluostrova Kamchatka (Okhotskoe more) po dannym sputnikovykh nablyudenii [Influence of wind and ice conditions on upwelling off the west coast of the Kamchatka Peninsula (Sea of Okhotsk) according to satellite observations] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2017. № 3. P. 22–28. (In Russian).
- Zhurbas V.M., Stipa T., Mallki P., Paka V.T., Kuz'mina N.P., Sklyarov V.E.* Mezomasshtabnaya izmenchivost' apvellinga v yugo-vostochnoi Baltike: IK-izobrazheniya i chislennoe modelirovanie [Mesoscale upwelling variability in the southeastern Baltic: IR images and numerical simulation] // *Okeanologiya*. 2004. V. 44. № 5. P. 660–669. (In Russian).