

А.Г. АНДРЕЕВ

Влияние стока реки Амур и прибрежного апвеллинга на циркуляцию вод в Татарском проливе (Японское море)

Проведен анализ распределения распресненных вод Амурского лимана в Татарском проливе (Японское море) в сентябре–октябре (2002–2017 гг.) с использованием спутниковых данных об уровне моря и концентрации взвешенного органического углерода. Исследование динамики вод с использованием спутниковых данных о скоростях геострофических течений и температуре вод показало межгодовую изменчивость циркуляции поверхностных вод, определяемую стоком р. Амур и прибрежным апвеллингом. При увеличении стока р. Амур (2013, 2016 гг.) повышается уровень моря, усиливается антициклональная (по часовой стрелке) циркуляция вод в северной части Татарского пролива и возрастает перенос вод Амурского лимана на юг вдоль побережья материка. При уменьшении водности р. Амур (2002, 2008 гг.) понижается уровень моря и формируется циклоническая циркуляция вод в северной части Татарского пролива. Прибрежный апвеллинг приводит к снижению уровня моря и возникновению циклонической циркуляции вод в Татарском проливе.

Ключевые слова: Японское море, сток р. Амур, спутниковые данные, уровень моря, циркуляция поверхностных вод.

Impact of the Amur River discharge and coastal upwelling on the water circulation in the Tartar Strait (the Japan Sea). A.G. ANDREEV (V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok).

The distribution of the low salinity Amur Lyman water in the Tartar Strait (the Japan Sea) was analyzed in September–October (2002–2017) using satellite data on sea surface height and concentration of suspended organic carbon. The study of water dynamics using satellite geostrophic velocities and water temperature showed the variability of surface water circulation, related to the Amur River discharge and coastal upwelling. An increase in the Amur River discharge (2013, 2016) results in the sea level rise and enhanced anticyclonal (clockwise) water circulation in the northern Tartar Strait and the Amur Lyman water transport to the south along the mainland. The decrease of the Amur River discharge (2002, 2008) leads to the low sea level and cyclonic water circulation in the northern Tartar Strait. Coastal upwelling leads to the decreased sea level and formation of the cyclonic water circulation in the Tartar Strait.

Key words: the Japan Sea, the Amur River discharge, satellite data, sea level, surface water circulation.

Введение

Сток р. Амур (около 350 км³/год) поступает в относительно узкий и вытянутый в меридиональном направлении Амурский лиман, соединяющий Японское и Охотское моря (рис. 1, а). Устьевая область Амура включает в себя устьевой участок реки и устьевое взморье, состоящее из Амурского лимана и прилегающих частей Сахалинского залива и Татарского пролива. Положение и площадь зоны смешения речных и морских вод зависят от сезона и водности реки. В теплую часть года (июнь–сентябрь) распресненные воды из Амурского лимана в основном поступают в Сахалинский залив (Охотское море), где

АНДРЕЕВ Андрей Григорьевич – доктор географических наук, ведущий научный сотрудник (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток). E-mail: andreev@poi.dvo.ru

формируется стоковая линза (сравнительно тонкий слой распресненных вод на поверхности моря) [5, 6]. Осенью под воздействием ветров северных румбов воды Амурского лимана поступают в Татарский пролив [9]. Изменения в стратификации и циркуляции, связанные со стоковыми линзами, влияют на потоки биогенных элементов, а также, через распределение взвешенных веществ, на световой режим подповерхностного слоя вод и, как следствие, воздействуют на биологическую продуктивность вод.

Спутниковые данные об уровне моря, солености и температуре поверхностных вод, концентрации взвешенного органического углерода позволили изучить влияние ветра и стока р. Амур на распространение вод Амурского лимана в северо-западной части Охотского моря [3]. В данной работе на основе анализа спутниковых данных об уровне моря, скоростях геострофических течений, температуре и концентрации взвешенного органического углерода исследовано влияние стока р. Амур на распределение вод Амурского лимана и циркуляцию вод в северной части Татарского пролива в сентябре–октябре.

Материал и методы

Наши исследования основываются на информации об уровне моря и скоростях геострофических течений с пространственным разрешением $1/4^\circ$ на $1/4^\circ$ (для исследуемого района ~30 км по долготе и ~15 км по широте), полученной по данным спутниковых измерений (<http://marine.copernicus.eu>) за 2002–2017 гг. Величина ошибки спутниковых данных об уровне моря (SSH), полученных с 2002 г. по настоящее время, составляет 1–2 см на расстоянии, превышающем 20 км от берега. Для интервала осреднения, равного 1 мес., ошибка данных об уровне моря (SSH) принята равной 0,8 см. Исходя из принятой величины ошибки SSH ошибка рассчитанных среднемесячных скоростей геострофических течений ($V = \delta SSH \cdot g/f/L$, где δSSH и L – соответственно разность уровня моря и расстояние между узлами сетки, g – ускорение свободного падения, f – параметр Кориолиса) для исследуемого района составляет 3–5 см/с.

Речные воды, поступающие в Амурский лиман, отличаются повышенным содержанием взвеси и окрашенного растворенного органического вещества, в связи с чем хорошо прослеживаются на снимках спутниковых спектрорадиометров (MODIS Aqua/Terra и др.) в видимом диапазоне спектра. Концентрация взвешенного органического углерода (BOY) в морской воде по данным сенсоров MODIS определяется по соотношению яркости отраженного излучения в желтом (длина волны 555 мкм) и синем (длина волны 443 мкм) диапазонах спектра [11]. В работе использовались данные дистанционных измерений температуры поверхностного слоя вод со спутников «Terra» – «Aqua» (радиометр MODIS) в инфракрасном диапазоне спектра с пространственным разрешением 4 км (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>). Для анализа фоновых гидрометеорологических условий привлекались данные о стоке р. Амур (Хабаровск) и направлению и скоростям ветра (Центр диагностики климата. – <http://www.esrl.noaa.gov>).

Результаты и обсуждение

Распределение вод Амурского лимана в Татарском проливе по спутниковым данным

Поступление вод Амурского лимана в северо-западную часть Охотского моря и северную часть Японского моря (Татарский пролив) определяется разностью уровня моря между данными бассейнами, ветровым режимом и водностью р. Амур. Около 85 % годового стока Амура приходится на теплый период года (май–октябрь). В связи с муссонным характером атмосферной циркуляции летом над исследуемым районом преобладают ветры юго-восточных, а осенью и зимой – северо-западных направлений. В июле и августе

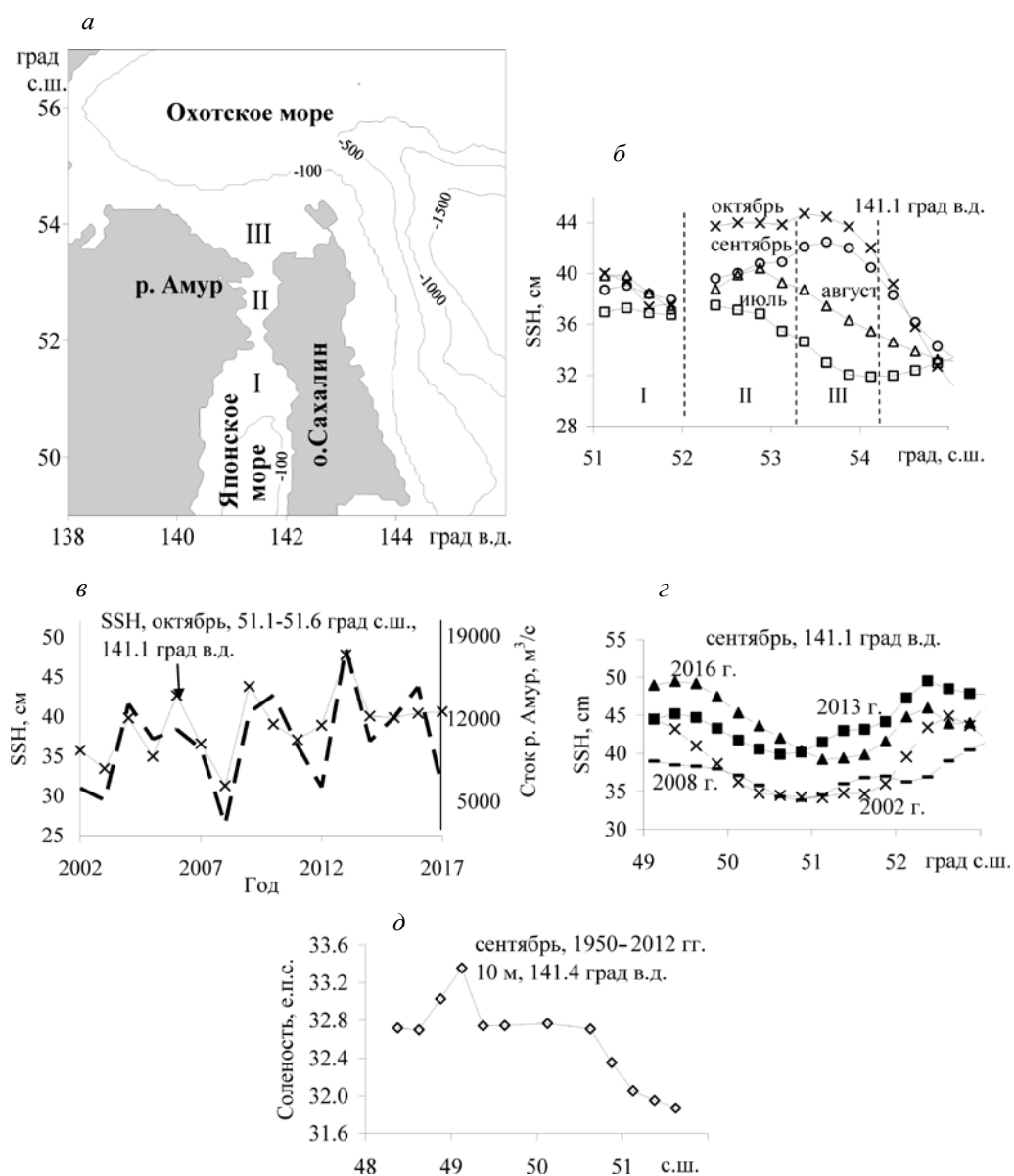


Рис. 1. Исследуемый район: *а* – карта: I – Татарский пролив, II – Амурский лиман, III – Сахалинский залив, *б* – распределение уровня моря (SSH) на разрезе вдоль 141,1° в.д. (2002 – 2017 гг.), *в* – межгодовые изменения стока р. Амур (май–июль) и уровня моря (октябрь) в северной части Татарского пролива, *г* – распределение уровня моря (SSH) на разрезе вдоль 141,1° в.д. в сентябре 2002, 2008, 2013 и 2016 гг., *д* – распределение солености в сентябре на разрезе вдоль 141,4° (141,125–141,625°) в.д. (экспедиционные данные, 1955–2012 гг. – www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13)

из-за значительной разности SSH между Амурским лиманом и Сахалинским заливом (рис. 1, б) основной поток вод Амурского лимана направлен в Сахалинский залив и прилегающую часть Охотского моря. В сентябре–октябре под воздействием северо-западных ветров и направленного на юго-запад экмановского переноса вод значительно повышается уровень моря в Сахалинском заливе (рис. 1, б), и часть вод Амурского лимана поступает на юг, в Татарский пролив. Адвекция вод Амурского лимана с низкой соленостью и плотностью вод понижает соленость (рис. 1, д) и повышает уровень моря (рис. 1, г) в северной части (к северу от 51° с.ш.) Татарского пролива.

Повышение (понижение) водности р. Амур в период весенне-летнего половодья приводит к росту (снижению) уровня моря ($r = 0,76$, 2002–2017 гг.) в северной части Татарского пролива в октябре (рис. 1, *в*) вследствие увеличения (уменьшения) притока вод Амурского лимана с пониженной соленостью и повышенными величинами SSH. На рис. 1, *г* представлено распределение SSH на меридиональном разрезе вдоль $141,5^\circ$ в.д. в сентябре в годы пониженной (2002 и 2008 гг.) и повышенной (2013 и 2016 гг.) водности р. Амур. Увеличение стока вод р. Амур в мае–июле 2013 и 2016 гг. способствовало значительному увеличению уровня моря в северной части Татарского пролива в сентябре 2013 и 2016 гг. Распределение вод Амурского лимана с повышенными величинами SSH (40–50 см) в северной части Татарского пролива в сентябре и октябре 2013 г. представлено на рис. 2, *б*, *г*. Высокие величины SSH, наблюдаемые в южной части Татарского пролива (к югу от 50° с.ш.) в сентябре–октябре (рис. 2, *а–г*) обусловлены поступлением в данный район субтропических трансформированных вод с повышенной температурой и пониженной плотностью [2].

Контрасты цвета на границах стоковой линзы Амура позволяют использовать спутниковые данные в видимом (концентрация взвешенного органического вещества) диапазоне спектра для исследования закономерностей распространения вод Амурского лимана в Татарском проливе. На рис. 2, *д–з* представлено распределение БОУ в сентябре–октябре 2008 и 2013 гг. – в годы пониженной и повышенной водности р. Амур. Увеличение стока вод Амура в мае–июле 2013 г. привело к значительному увеличению концентрации БОУ в северной части Татарского пролива в сентябре 2013 г. (рис. 2, *е*). Распределение взвешенного органического углерода (БОУ) согласуется с распределением SSH в северной части Татарского пролива: повышенным величинам SSH соответствуют повышенные концентрации БОУ. Смена направления ветра с юго-западного (сентябрь 2013 г.) на северо-западное (октябрь 2013 г.) способствовало распространению вод Амурского лимана (высокие величины SSH и концентрации БОУ) на юг вдоль побережья материка (рис. 2, *з*, *з*).

Различия в распределении SSH и концентраций БОУ в Татарском проливе между сентябрем 2008 г. и сентябрем 2013 г. (рис. 2, *а*, *б*, *д*, *е*) и между октябрем 2008 г. и октябрем 2013 г. (рис. 2, *в*, *г*, *ж*, *з*) не связаны с ветровым режимом. В сентябре 2008 г. и сентябре 2013 г. над исследуемым районом преобладали ветры юго-западных румбов со скоростями 4–9 м/с, в октябре 2008 г. и октябре 2013 г. – северо-западных румбов со скоростями 4–12 м/с.

Согласно результатам расчетов течений с использованием экспедиционных данных [7, 8] и данным моделирования циркуляции вод с использованием численных моделей [10, 12] летом общая циркуляция вод в северной и центральной частях Татарского пролива является преимущественно циклонической. Западное звено циклонической циркуляции вод (течения Шренка или Лиманское) направлено на юг вдоль материка. Западно-Сахалинское течение направлено на север вдоль берега о-ва Сахалин. Осенью в северной части Татарского пролива образуется мощный антициклональный вихрь. Адвекция субтропических вод с повышенной температурой из Восточно-Китайского моря через Корейский пролив увеличивает уровень моря и оказывает влияние на направление и скорость геострофических течений в Татарском проливе летом и осенью [2]. Антициклональная/циклональная циркуляция вод в южной части Татарского пролива наблюдается в периоды повышения/понижения разностей уровня между Корейским проливом и прол. Лаперуза и увеличения/снижения притока вод с повышенной температурой в северную часть Японского моря.

На рис. 2, *д–з* показана циркуляция вод в северной части Татарского пролива в сентябре–октябре 2008 г. (пониженная водность р. Амур) и 2013 г. (повышенная водность р. Амур (рис. 1, *в*)). Циркуляция вод в сентябре–октябре 2013 г. представляла собой «классическую» схему течений для осеннего периода [7, 8]. В вершине Татарского пролива наблюдалась антициклональная (по часовой стрелке) циркуляция вод, вызванная поступлением в данный район вод Амурского лимана с низкой соленостью и плотностью (повышенные величины SSH). В центральной части Татарского пролива преобладала

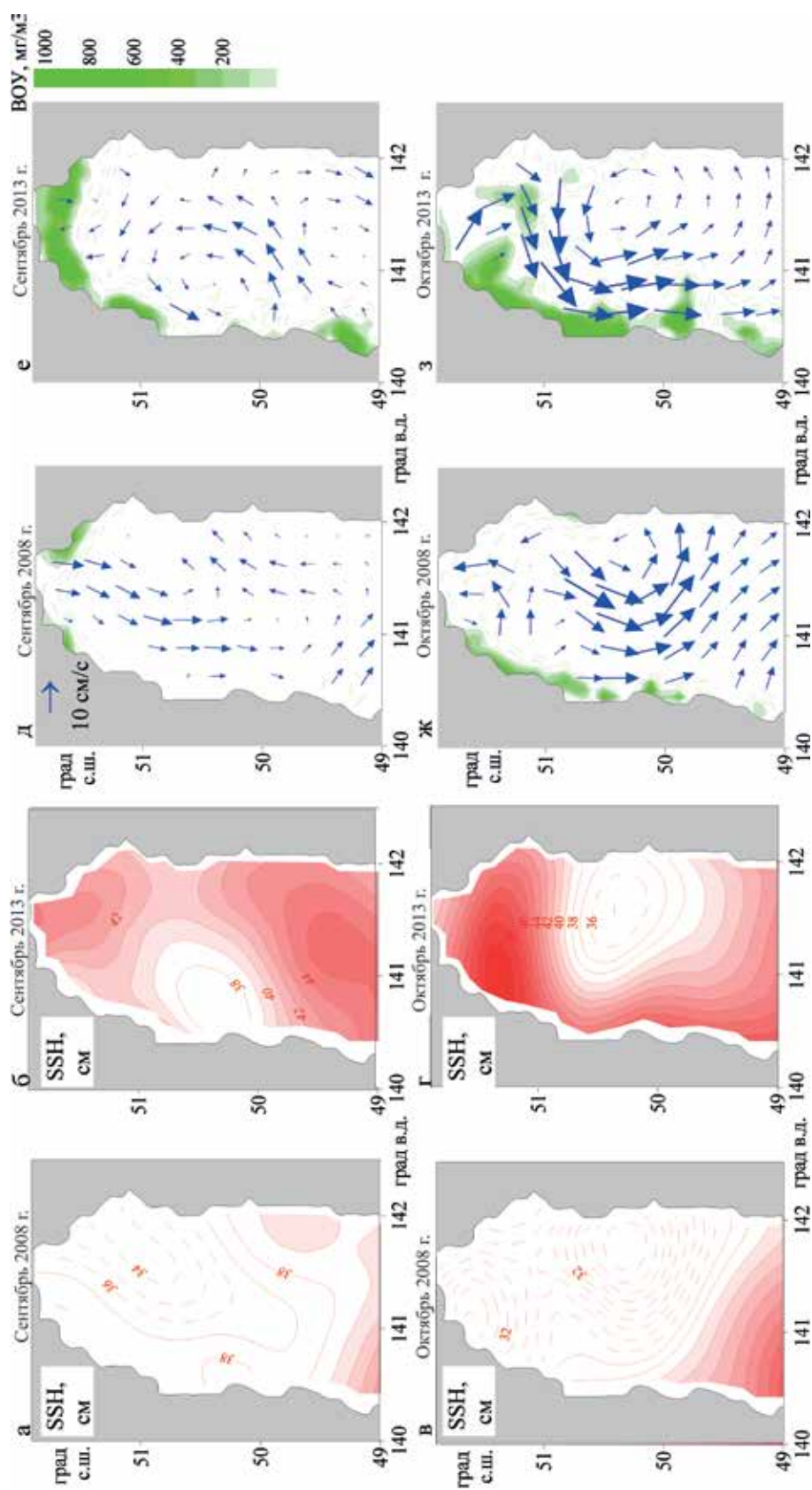


Рис. 2. Распределение уровня моря (изолинии и оттенки красного цвета), поле поверхностных геострофических течений (стрелки) и распределение концентрации взвешенного органического углерода (оттенки зеленого цвета) в Татарском проливе в сентябре–октябре 2008 и 2013 гг.

циклоническая циркуляция вод. Снижение водности р. Амур в мае–июле 2008 г. и уменьшение поступления вод Амурского лимана в северную часть Татарского пролива сопровождались циклонической циркуляцией вод в центральной и северной частях Татарского пролива в октябре 2008 г. (рис. 2, ж).

Влияние прибрежного апвеллинга на циркуляцию вод в Татарском проливе

Прибрежный апвеллинг вызывается ветром, дующим параллельно берегу таким образом, что берег остается слева, в Северном полушарии. В августе–сентябре благоприятные условия для развития устойчивого прибрежного апвеллинга в Татарском проливе наблюдаются у побережья материка [4], которое расположено слева относительно направления преобладающих ветров южных румбов. Преобладающие зимние муссонные ветры северного направления создают благоприятные условия для развития апвеллинга вдоль западного побережья о-ва Сахалин в октябре–ноябре. Апвеллинг и связанный с этим явлением подъем вод сопровождается понижением температуры поверхностных вод. Термические контрасты на поверхности моря позволяют выделить зоны апвеллинга по распределению температуры на поверхности моря, значения которой получены по спутниковым данным (рис. 3). В середине сентября 2013 г. в Татарском проливе наблюдалось снижение поверхностной температуры по направлению к побережью материка от 17 до 13–15 °С. Под воздействием ветров юго-западных румбов пятно вод с пониженной температурой перемещалось в северо-восточном направлении (рис. 3, а). Апвеллинг у западного побережья о-ва Сахалин в середине октября 2008 г. сопровождался снижением поверхностной температуры по направлению к берегу от 10 до 2–4 °С (рис. 3, б). Подъем глубинных вод с повышенной плотностью (пониженной температурой и повышенной соленостью) привел к снижению уровня моря (рис. 2, б–г) и возникновению циклональной циркуляции вод в западной части Татарского пролива в сентябре 2013 г. (рис. 2, е) и восточной части Татарского пролива в октябре 2008 г. и октябре 2013 г. (рис. 2, ж, з). Формирование мезомасштабной циклональной циркуляции вод в зоне апвеллинга вблизи восточного побережья Сахалина (Охотское море) показано нами в работе [1].

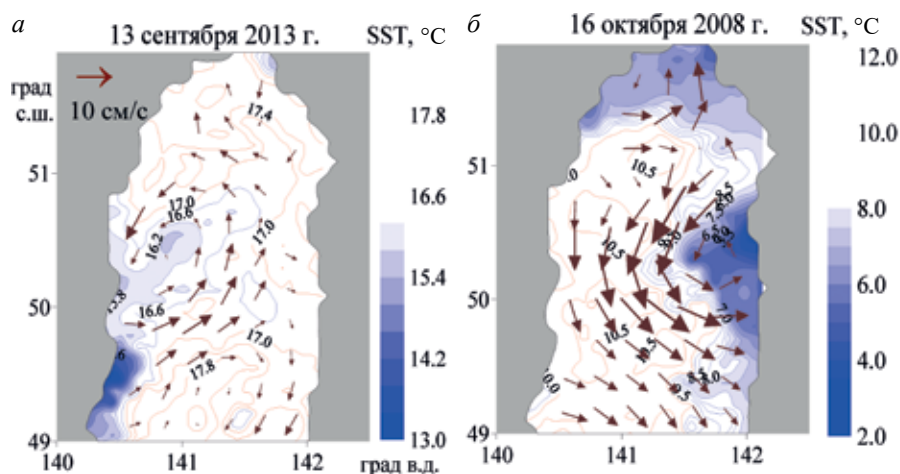


Рис. 3. Поле поверхностных геострофических течений и распределение температуры (изолинии и оттенки синего цвета) в поверхностном слое вод в сентябре 2013 г. (а) и октябре 2008 г. (б)

Разница в SSH (~10 см) между западной и восточной частями Татарского пролива в октябре 2013 г. (рис. 2, з) вызвала усиление течения Шренка (скорости геострофических течений возросли до 17–20 см/с), направленного вдоль побережья материка на юг (рис. 2, з).

Заключение

Исследование динамики вод в Татарском проливе в сентябре–октябре 2002–2017 гг. с использованием спутниковых данных об уровне моря, концентрации взвешенного органического углерода, скоростях геострофических течений и температуре вод показало межгодовую изменчивость циркуляции поверхностных вод, определяемую стоком р. Амур и прибрежным апвеллингом. При увеличении стока р. Амур (2013, 2016 гг.) повышается уровень моря, усиливается антициклональная (по часовой стрелке) циркуляция вод в северной части Татарского пролива и возрастает перенос вод Амурского лимана на юг вдоль побережья материка. При уменьшении водности р. Амур (2002, 2008 гг.) понижается уровень моря и формируется циклоническая циркуляция вод в северной части Татарского пролива. Прибрежный апвеллинг и связанный с этим явлением подъем глубоких вод с повышенной плотностью приводит к снижению уровня моря и возникновению циклональной циркуляции вод в Татарском проливе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев А.Г. Мезомасштабная циркуляция вод в районе Восточно-Сахалинского течения (Охотское море) // Исследования Земли из космоса. 2017. № 2. С. 3–12.
2. Андреев А.Г. Особенности циркуляции вод в южной части Татарского пролива // Исследования Земли из космоса. 2018. № 1. С. 3–11.
3. Андреев А.Г. Распределение распресненных вод Амурского лимана в Охотском море по данным спутниковых наблюдений // Исследования Земли из космоса. 2019. № 2. С. 89–96.
4. 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) // Метеорол. и гидрология. 2017. № 3. С. 58–67.
5. Жабин И.А., Абросимова А.А., Дубина В.А., Некрасов Д.А. Влияние стока реки Амур на гидрологические условия Амурского лимана и Охотского моря // Метеорол. и гидрология. 2010. № 4. С. 93–100.
6. Жабин И.А., Дубина В.А., Некрасов Д.А., Дударев О.В. Структурные особенности зоны смешения речных и морских вод вблизи устья реки Амур по данным спутниковых и гидрологических наблюдений // Исследования Земли из космоса. 2007. № 5. С. 61–70.
7. Пищальник В.М., Архипкин В.С., Юрасов Г.И., Ермоленко С.С. Сезонные вариации циркуляции вод в прибрежных районах о. Сахалин // Метеорол. и гидрология. 2003. № 5. С. 87–94.
8. Юрасов Г.И., Яричин В.Г. Течения Японского моря. Владивосток: ТОИ ДВО РАН. 1991. 174 с.
9. Якунин Л.П. Распределение водного стока по фарватерам устья Амура // Тр. ДВНИГМИ. 1978. Вып. 71. С. 162–166.
10. Kim T.-K., Yoon J.-H. Seasonal variation of upper layer circulation in the Northern part of the East/Japan Sea // Continental Shelf Res. 2010. Vol. 30. P. 1283–1301.
11. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Particulate Organic Carbon Data; 2018 Reprocessing. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. DOI: 10.5067/AQUA/MODIS/L3M/POC/2018.
12. Ponomarev V.I., Fayman P.A., Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu. Simulation of mesoscale circulation in the Tatar Strait of the Japan Sea // Ocean modeling. 2018. Vol. 126. P. 43–55.