

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕСНЕННЫХ ВОД АМУРСКОГО ЛИМАНА В ОХОТСКОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2019 г. А. Г. Андреев*

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

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

Поступила в редакцию 18.03.2019 г.

Проведен анализ распределения распресненных вод Амурского лимана в северо-западной части Охотского моря в летний период с использованием спутниковых данных по уровню моря, солёности, температуре и концентрации взвешенного органического углерода. Наблюдается хорошее согласие между пространственным распределением солёности поверхностных вод (данные спутника SMAP) и уровнем морем (данные AVISO) в исследуемом районе. Идентификация вод Амурского лимана по температуре поверхностных вод и концентрации взвешенного органического углерода ограничена Сахалинским заливом и прибрежными водами острова Сахалина. Увеличение (уменьшение) стока реки Амур в период весеннее-летнего половодья приводит к повышению (снижению) уровня моря в северной части Сахалинского залива в июле. Усиление ветров северо-западных (юго-восточных) румбов в сентябре уменьшает (увеличивает) приток вод с пониженной солёностью и повышенными величинами уровня моря в район к северу от Сахалинского залива.

Ключевые слова: река Амур, Охотское море, спутниковые данные, уровень моря, солёность поверхностных вод

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019289-96>

ВВЕДЕНИЕ

Сток реки Амур (около 350 км³/год) поступает в относительно узкий и вытянутый в меридиональном направлении Амурский лиман, соединяющий Японское и Охотское моря (рис. 1а). 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 зависит от сезона и водности реки. В теплую часть года (июнь–сентябрь) распресненные воды из Амурского лимана поступают в Сахалинский залив, где формируется стоковая линза (сравнительно тонкий слой распресненных вод на поверхности моря). По краям стоковой линзы формируются стоковые фронты и струйные течения, а под ней — резкие слои скачка солёности, температуры и плотности (Жабин и др., 2010). Изменения в стратификации и циркуляции, связанные со стоковыми линзами, влияют на горизонтальные и вертикальные потоки биогенных элементов и, через распределение растворенных и взвешенных веществ, на световой режим верхнего слоя. Зоны смешения речных и морских вод играют ключевую роль в локальных шельфовых

физических и биогеохимических процессах и во многом определяют функционирование прибрежных экосистем. Воды реки Амур, загрязненные промышленными и бытовыми отходами, влияют на экологию вод Амурского лимана и прилегающие к нему районы Охотского и Японского морей.

В последние годы проведены исследования структурных особенностей зоны смешения речных и морских вод вблизи устья реки Амур с использованием спутниковых изображений в видимом и инфракрасном диапазонах спектра и экспедиционных данных (Жабин и др., 2007, 2010; Дубина и др., 2012). В частности, был зарегистрирован вынос распресненных вод за северную оконечность о. Сахалин. Данные дистанционных измерений в видимом диапазоне спектра с ИСЗ “SeaStar” (сканер SeaWIFS) позволили обнаружить важную особенность динамической структуры вод Сахалинского залива — струйное течение на границе стоковой линзы р. Амур (Жабин и др., 2007, 2010). В данной работе на основе анализа спутниковых данных по солёности поверхностных вод и уровню моря исследована пространственная изменчивость распределения вод Амурского лимана в Сахалинском заливе и прилегающем районе Охотского моря.

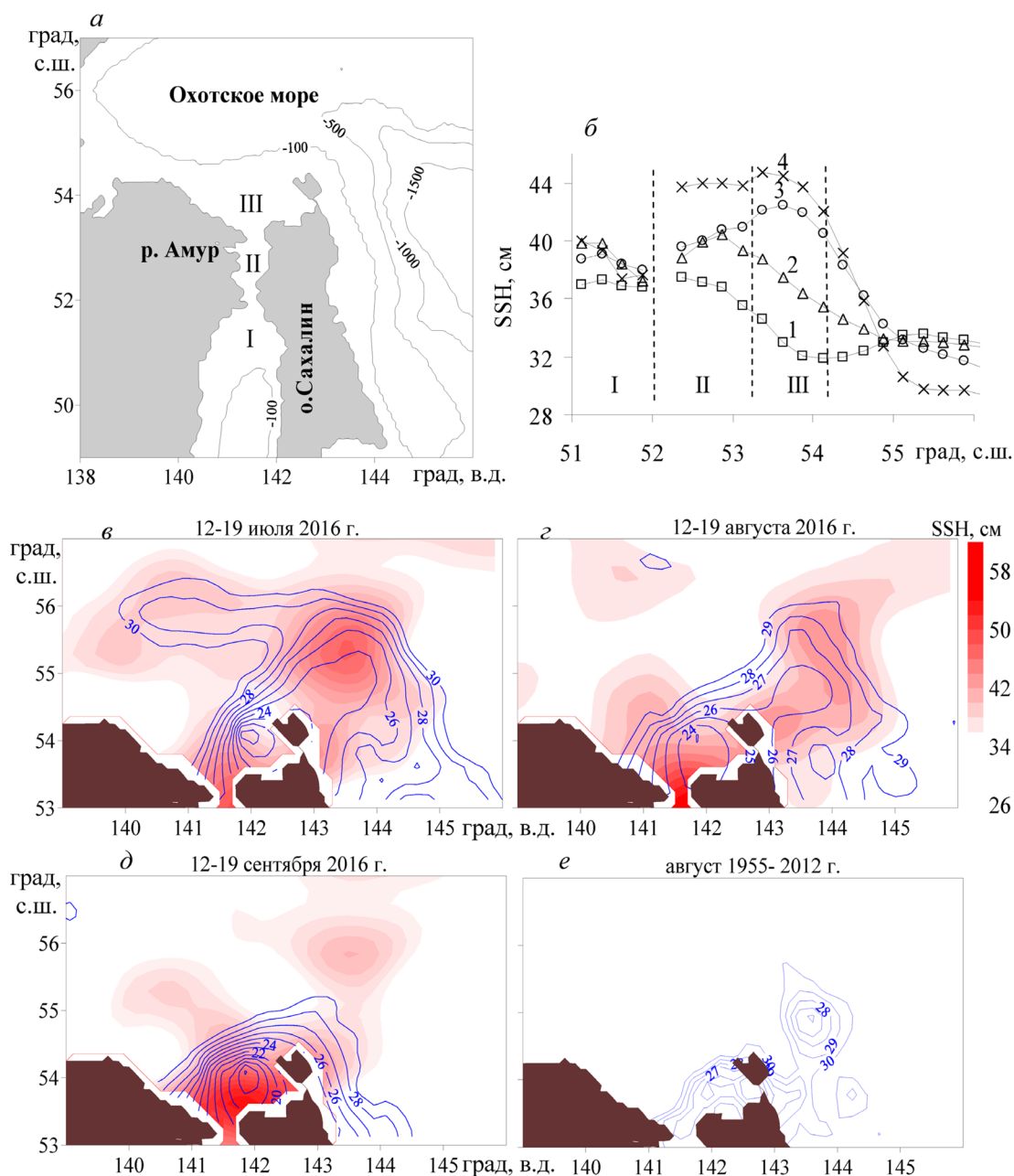


Рис. 1. *a, б* — карта исследуемого района и распределение уровня моря (SSH) на разрезе вдоль 141.4 град в.д. по данным AVISO (2002 – 2017 гг.): I — Татарский пролив, II — Амурский лиман, III — Сахалинский залив, 1 — июль, 2 — август, 3 — сентябрь, 4 — октябрь; *в–д* — распределение солёности в поверхностном слое вод по данным спутника SMAP (показано изолиниями) и распределение уровня моря по данным AVISO (показано оттенками красного цвета); *е* — распределение солёности в поверхностном слое вод (экспедиционные данные, 1955–2012 гг.).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наши исследования основываются на информации по уровню моря 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.aviso.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

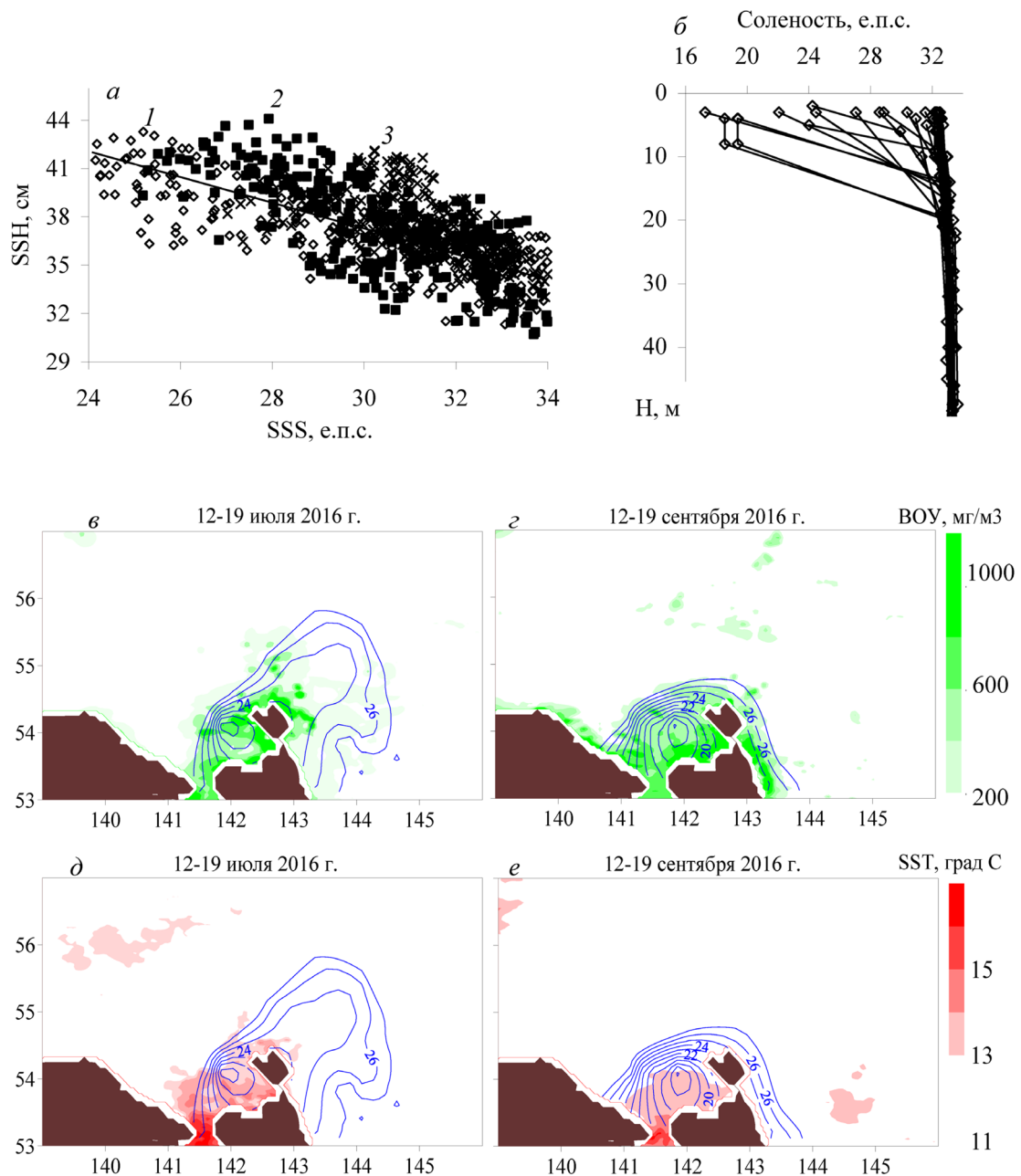


Рис. 2. *a* — зависимость уровня моря (данные AVISO) от солёности поверхностных вод (данные спутника SMAP): 1 — июль 2015–2017 гг., 2 — август 2015–2017 гг., 3 — сентябрь 2015–2017 гг. *б* — вертикальное распределение солёности в Сахалинском заливе (август); *в–г* — распределение солёности (показано изолиниями) и концентрации взвешенного органического углерода (показано оттенками зеленого цвета) в поверхностном слое вод по данным спутников SMAP и Aqua; *д–е* — распределение солёности (показано изолиниями) и температуры (показано оттенками красного цвета) в поверхностном слое вод по данным спутников SMAP и Aqua.

изменением атмосферного давления, рассчитываются по уравнению обратного барометра. Величина ошибки спутниковых данных AVISO по уровню моря (SSH), полученных в период с 2002 г. по настоящее время, составляет 1–2 см на расстоянии превышающим 20–40 км от берега (Ablain et al., 2015).

Спутниковые данные по солёности поверхностных вод (Sea Surface Salinity) (SSS) за период с 2015 по 2017 гг. получены по данным измерений спутника НАСА SMAP (Soil Moisture Active Passive) (<http://www.remss.com>), запущенного на орбиту 31 января 2015 г. (Fournier et al., 2017; Grodsky et al., 2018). Интерферометр-радиометр, установленный

на спутнике SMAP, позволяет проводить измерения солености морских вод и скорости ветра над морской поверхностью. Радиометр дает изображения, соответствующие интенсивности собственного излучения поверхности в L-диапазоне (длина волны 21 см). Вычисление значений солености осуществляется на основе измеренных значений яркостной температуры в L-диапазоне при разных углах наклона и поляризации приемной антенны. Данные по SSS имеют пространственное разрешение 1/4 град на 1/4 град (для исследуемого района: ~30 км по долготе и ~15 км по широте) и временное разрешение 8 суток. Ошибка спутниковых данных по SSS зависит от температуры поверхностных вод (SST). Она наибольшая для SST менее 10 °C и уменьшается с увеличением температуры вод. В интервале 10–20 °C, яркостная температура практически не чувствительна к величине SST (Meissner et al., 2016). Мы проводили анализ распределения SSS в северо-западной части Охотского моря в летний период (июль–сентябрь), когда SST в исследуемом регионе превышает 10 °C. Точность измерений SSS по данным спутника SMAP ($\leq 0,2$ е.п.с.) достаточна для изучения распределения солености в северо-западной части Охотского моря, характеризующейся значительной пространственно-временной изменчивостью величин солености морской воды (20–34 е.п.с.) в летний период.

Речные воды, поступающие в Амурский лиман и Сахалинский залив, отличаются повышенным содержанием взвеси и окрашенного растворенного органического вещества. Поэтому эти воды хорошо прослеживаются на снимках спутниковых спектрорадиометров (MODIS Aqua/Terra и др.) в видимом диапазоне спектра. Концентрация взвешенного органического углерода 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) диапазоне спектра (NASA, 2018). Для характеристики термической структуры поверхностного слоя и закономерностей распространения и перемешивания речных вод в работе использовались данные дистанционных измерений SST 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

Поступление вод Амурского лимана в СЗ часть Охотского моря и северную часть Японского моря (Татарский пролив) определяется разностью уровня моря между данными бассейнами, ветровым режимом и водностью реки Амур. Около 85% от годового стока реки Амур приходится на теплый период года (май–октябрь). В связи с муссонным характером атмосферной циркуляции летом над СЗ частью Охотского моря преобладают ветра юго-восточных направлений, а осенью и зимой — ветра северо-западных направлений. В июле и августе, из-за значительной разности SSH между Амурским лиманом и Сахалинским заливом (рис. 1б), основной поток вод Амурского лимана направлен в Сахалинский залив и прилегающую часть Охотского моря. Осенью под воздействием северо-западных ветров и направленного на юго-запад экмановского переноса вод значительно повышается уровень моря в Сахалинском заливе (рис. 1б), и часть вод Амурского лимана поступает на юг в Татарский пролив.

Распределение солености поверхностных вод и уровня моря в июле–сентябре 2016 г. (рис. 1в–е) демонстрирует проникновение вод Амурского лимана с пониженной соленостью ($SSS = 18–30$ е.п.с.) и повышенными величинами SSH (40–50 см) в СЗ часть Охотского моря. Под воздействием силы Кориолиса воды Амурского лимана концентрировались в восточной части Сахалинского залива и вблизи северной оконечности острова Сахалин. В июле и августе 2016 г. наблюдался вынос вод Амурского лимана в северо-западном направлении на расстояние превышающее 350 км от северной оконечности острова Сахалин. В середине июля 2016 г. под действием ветров юго-восточных румбов со скоростями 5 м/с отмечалась адвекция вод с соленостью 29–30 е.п.с. в западном направлении вдоль параллели 56° с.ш. от 143.5° в.д. до 140° в.д. (рис. 1в). Усиление ветров северо-западного направления до 7–9 м/с в период с 8 по 15 сентября вызвало концентрирование вод Амурского лимана в Сахалинском заливе (рис. 1д). Пространственное распределение SSS по данным спутника SMAP в августе 2016 г. (рис. 1е) согласуется с распределением солености в исследуемом регионе в августе месяце, полученным по результатам многолетних (1955–2012 гг.) экспедиционных наблюдений (рис. 1е).

Значительные горизонтальные градиенты уровня моря по краям стоковой линзы в СЗ части Охотского моря (53.8°–54.4° с.ш.) приводили к появлению направленных на восток струйных течений. В июле–августе 2002–2017 гг. скорости

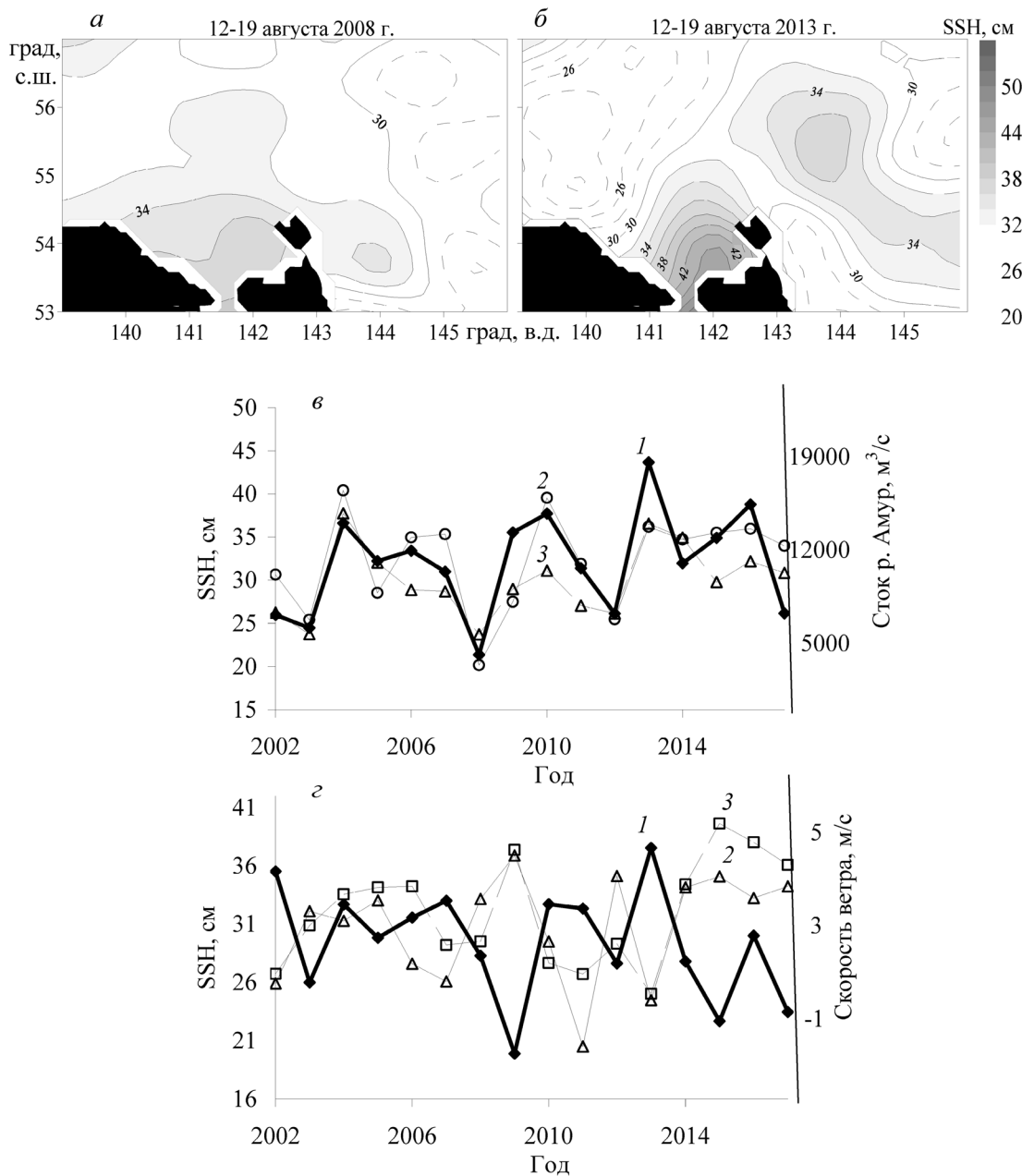


Рис. 3. *а, б* — распределение уровня моря по данным AVISO в августе 2008 г. и августе 2013 г. (показано оттенками серого цвета и изолиниями); *в* — межгодовая изменчивость уровня моря (SSH) в июле и стока реки Амур (май–июль): 1 — сток реки Амур, 2 — SSH (54.4° с. ш., 141.6°–141.9° в. д.), 3 — SSH (54.6°–54.9° с. ш., 139.6° в. д.); *з* — межгодовая изменчивость уровня моря (SSH) и зональной составляющей скорости ветра (55° с. ш., 142.5° в. д.) в сентябре: 1 — скорость ветра, 2 — SSH (55.4°–55.6° с. ш., 139.1° в. д.), 3 — SSH (55.6°–55.9° с. ш., 140.4° в. д.).

геострофических течений (база данных AVISO, <http://www.aviso.altimetry.fr>) на поверхности были 15–25 см/с, в сентябре–октябре — 25–45 см/с.

Экспедиционные данные, полученные в июне–июле 2005 г. (Жабин и др., 2007, 2010) и августе 1993 г. (рис. 2б), показывают, что поступление вод Амурского лимана в СЗ часть Охотского моря сопровождается изменением солёности, температуры и плотности в верхнем 10 м слое вод.

Уменьшение солёности с 34 до 24 е.п.с. при температуре 15 °С в слое 10 м (*z*) в СЗ части Охотского моря, вызванное адвекцией вод Амурского лимана, понижает плотность вод (ρ) с 1026 до 1018 кг/м³ и, следовательно, должно приводить к увеличению уровня моря на 8 см ($\Delta SSH = \Delta\rho/\rho \cdot z$). Наблюдаемое при этом повышение температуры вод с 10 до 15 °С понижает плотность морской воды на 0.7 кг/м³ и даёт незначительный вклад (0.7 см)

в изменение уровня моря. Представленная на рис. 2а зависимость SSH от SSS для исследуемого района по спутниковым данным, полученным в июле—сентябре 2015—2017 гг., согласуется с нашими расчетами зависимости уровня моря от изменений солёности вод. Отклонение уровня моря от рассчитанных величин SSH ($SSH \sim 0.8 \cdot SSS$, см) (рис. 2а) может быть обусловлено точностью измерения SSH (1–2 см) и изменениями толщины стоковой линзы.

Контрасты цвета и температуры на границах стоковой линзы Амура позволяют использовать спутниковые наблюдения в инфракрасном (SST) и в видимом (концентрация взвешенного органического вещества) диапазонах спектра для исследования закономерностей распространения вод Амурского лимана в СЗ части Охотского моря (Жабин и др., 2007, 2010; Дубина и др., 2012). В июле—сентябре 2016 г. теплые воды, связанные со стоковой линзой реки Амур, наблюдались в Амурском лимане и в Сахалинском заливе. Для вод с $SSS \leq 24$ е.п.с. наблюдалось согласие между пространственным распределением вод с пониженной солёностью и повышенной температурой (рис. 2д, е). На выходе из Сахалинского залива температурные контрасты на границах вод стоковой линзы значительно уменьшались, что могло быть следствием вертикального и горизонтального перемешивания с шельфовыми водами СЗ части Охотского моря, характеризующимися отрицательными температурами в подповерхностном слое вод. Распределение взвешенного органического углерода (ВОУ) согласуется с распределением SSS в пределах Сахалинского залива: пониженным солёностям соответствуют повышения концентрации ВОУ. На картах заметны следы выноса вод с повышенными концентрациями ВОУ за северную оконечность острова Сахалин. На расстояниях свыше 100 км от Сахалинского залива SST и ВОУ не являются надежными трассерами для исследования распространения вод Амурского лимана в СЗ части Охотского моря из-за значительного снижения контрастов температуры и цветности на границах стоковой линзы. По данным экспедиционных исследований (Агатова и др., 1996) сток реки Амур приводит к увеличению концентраций растворенного (размер частиц менее 0.7 мкм) и взвешенного (размер частиц более 0.7 мкм) органического вещества в Сахалинском заливе до 1400 мг С/м^3 и 600 мг С/м^3 соответственно. Аномально высокие концентрации взвешенного органического углерода по спутниковым данным ($>1000 \text{ мг С/м}^3$) могут быть обусловлены вкладом растворенного органического вещества в рассчитанные величины ВОУ.

Используя данные по уровню моря нами исследовано влияние водности реки Амур в период весенне-летнего половодья (май—июль) и ветрового режима на пространственно-временную изменчивость положения стоковой линзы в СЗ части Охотского моря в летний период 2002—2017 гг. Повышение (понижение) водности реки Амур в период весенне-летнего половодья приводит к росту (снижению) уровня моря ($r = 0.73\text{--}0.77$, 2002—2017 гг.) в северной части Сахалинского залива в июле (рис. 3е), что может быть следствием увеличения (уменьшения) притока вод Амурского лимана с пониженной солёностью и повышенными величинами SSH. На рис. 3а, б представлено распределение SSH в августе 2008 г. и в августе 2013 г., в годы пониженной и повышенной водности реки Амур. Увеличение стока вод реки Амур в мае—июле 2013 г. способствовало значительному увеличению уровня моря в восточной части Сахалинского залива и формированию замкнутой антициклональной линзы к северо-востоку от острова Сахалин с повышенными величинами SSH в ее центре.

В сентябре в период перехода от летнего к зимнему муссону, ветровой режим в СЗ части Охотского моря не устойчив. Усиление ветров северо-западных (юго-восточных румбов) в сентябре уменьшает (увеличивает) приток вод с пониженной солёностью и повышенными величинами SSH ($r = -(0.72\text{--}0.79)$, 2002—2017 гг.) в район к северу от Сахалинского залива (рис. 3з).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовалось распределение распресненных вод Амурского лимана в северо-западной части Охотского моря в летний период с использованием спутниковых данных по уровню моря, солёности, температуре и концентрации взвешенного органического углерода. Наблюдается хорошее согласие между пространственным распределением солёности поверхностных вод (данные спутника SMAP) и уровнем морем (данные AVISO) в исследуемом районе. Идентификация вод Амурского лимана по температуре поверхностных вод и концентрации взвешенного органического углерода ограничена Сахалинским заливом и прибрежной частью острова Сахалина. Повышение водности реки Амур в период весенне-летнего половодья приводит к росту уровня моря в северной части Сахалинского залива в июле, что может быть следствием увеличения притока вод Амурского лимана с пониженной солёностью и повышенными величинами уровня моря. Усиление ветров северо-западных (юго-восточных румбов)

в сентябре уменьшает (увеличивает) приток вод с пониженной соленостью и повышенными величинами уровня моря в район к северо-западу от Сахалинского залива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агатова А.И., Дафнер Е.В., Сапожников В.В., Торгунова Н.И., Уколова Т.К. Основные закономерности распределения растворенного и взвешенного органического вещества в Охотском море // *Океанология*. 1996. Т. 36. № 6. С. 856–864.

Дубина В.А., Файман П.А., Жабин И.А., Пономарев В.И., Кузлякина Ю.А. Течения Охотского моря по спутниковым данным и результатам численного моделирования // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 1. С. 206–212.

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 // *Исслед. Земли из космоса*. 2007. № 5. С. 61–70.

Жабин И.А., Абросимова А.А., Дубина В.А., Некрасов Д.А. Влияние стока реки Амур на гидрологические условия Амурского лимана и Охотского моря // *Метеорология и гидрология*. 2010. № 4. С. 93–100.

Fournier S., Vialard J., Lengaigne M., Lee T., Gierach M.M., Chaitanya A. V. S. Modulation of the Ganges- Brahmaputra river plume by the Indian Ocean dipole and eddies inferred from satellite observations // *J. of Geophysical Research: Oceans*. 2017. V. 122. P. 9591–9604.

Grodsky S.A., Vandemark D., Feng H. Assessing Coastal SMAP Surface Salinity Accuracy and Its Application to Monitoring Gulf of Maine Circulation Dynamics // *Remote Sens.* 2018. V. 10. 1232; doi:10.3390/rs10081232.

Meissner T., Wentz F.J., Scott J., Vazquez-Cuervo J. Sensitivity of ocean surface salinity measurements from spaceborne L- band radiometers to ancillary sea surface temperature // *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*. 2016. V. 54. № 12. P. 7105–7110.

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.

The Distribution of the Desalinated Waters of the Amur Estuary in the Okhotsk Sea According to Satellite Observations

A. G. Andreev

VI. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok

The distribution of the desalinated waters of the Amur Estuary in the Northwestern Okhotsk Sea during the summer period was analyzed using satellite data on sea level, salinity, temperature and concentrations of suspended organic carbon. There is good agreement between the spatial distribution of surface water salinity (data from the SMAP satellite) and the sea level (AVISO data) in the study area. The identification of the waters of the Amur Estuary by the surface water temperature and the concentration of suspended organic carbon is limited to the Sakhalin Bay and the coastal waters of Sakhalin Island. An increase (decrease) in the flow of the Amur River during the spring-summer flood leads to an increase (decrease) in sea level in the northern part of the Sakhalin Bay in July. Strengthening of the northwestern (southeastern) winds in September reduces (increases) the inflow of waters with low salinity and elevated sea level to the area north of the Sakhalin Bay.

Keywords: Amur River, Okhotsk Sea, satellite data, sea level, surface water salinity

REFERENCES

Agatova A.I., Dafner E.V., Sapozhnikov V.V., Torgunova N.I., Ukolova T.K. Osnovnye zakonomernosti raspredeleniya rastvorenogo i vzveshennogo organicheskogo veshchestva v Okhotskom more [The main patterns of distribution of dissolved and suspended organic matter in the Sea of Okhotsk] // *Okeanologiya*. 1996. T. 36. № 6. S. 856–864. (In Russian).

Dubina V.A., Fayman P.A., Zhabin I.A., Ponomarev V.I., Kuzlyakina Yu.A. Techeniya Okhotskogo morya po sputnikovym dannym i rezultatam chislenного modelirovaniya [Flows of the Sea of Okhotsk using satellite data and numerical simulation results] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2012. T. 9. № 1. S. 206–212. (In Russian).

Fournier S., Vialard J., Lengaigne M., Lee T., Gierach M. M., Chaitanya A. V. S. Modulation of the Ganges- Brahmaputra river plume by the Indian Ocean dipole and eddies inferred from satellite observations // *J. of Geophysical Research: Oceans*. 2017. V. 122. P. 9591–9604.

Grodsky S.A., Vandemark D., Feng H. Assessing Coastal SMAP Surface Salinity Accuracy and Its Application to Monitoring Gulf of Maine Circulation Dynamics // *Remote Sens.* 2018. V. 10. 1232; doi:10.3390/rs10081232.

Meissner T., Wentz F.J., Scott J., Vazquez-Cuervo J. Sensitivity of ocean surface salinity measurements from spaceborne L- band radiometers to ancillary sea surface temperature // *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*. 2016. V. 54. № 12. P. 7105–7110.

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.

Zhabin I.A., Abrosimova A.A., Dubina V.A., Nekrasov D.A. Vliyanie stoka reki Amur na gidrologicheskie usloviya Amurskogo limana i Okhotskogo morya [Influence of the Amur River flow on the hydrological conditions of the

Amur Estuary and the Sea of Okhotsk] // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2010. № 4. S. 93–100. (In Russian).

Zhabin I.A., Dubina V.A., Nekrasov D.A., Dudarev O.V. Strukturnye osobennosti zony smesheniya rechnykh i morskikh vod vblizi ustya reki Amur po dannym sputnikovykh i gidrologicheskikh nablyudeniy [Structural features of the mixing zone of river and sea waters near the mouth of the Amur River according to satellite and hydrological observations] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2007. № 5. S 61–70. (In Russian).