

А.Г. АНДРЕЕВ

## Межгодовые изменения параметров морской воды в поверхностном и промежуточном слоях Японского моря

*На основе данных спутниковой альтиметрии и результатов наблюдений за уровнем моря на прибрежных мареографных станциях исследованы межгодовые изменения уровня моря в Японском и Восточно-Китайском морях за период с 1970 по 2016 г. Установлено, что повышение уровня моря (0,3–0,5 см/год) в северной части Восточно-Китайского моря с 1984 по 2016 г. приводило к увеличению затока вод в Японское море через Корейский пролив. Показано, что увеличение поступления вод Восточно-Китайского моря – основная причина повышения температуры, понижения солености, концентрации растворенного кислорода и pH в поверхностном (горизонт 50 м) и промежуточном (горизонт 500 м) слоях в южной и центральной областях Японского моря.*

*Ключевые слова:* Японское море, Восточно-Китайское море, уровень моря, концентрация растворенного кислорода, pH.

**Interannual changes of the seawater parameters in the surface and intermediate water-layer of the Japan Sea.**  
A.G. ANDREEV (V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok).

*The sea level interannual changes in the Japan and the East-China Seas for the period from 1970 to 2016 has been investigated using satellite altimetry and coastal tide-gauge data. We identified that an increase of the sea level (0.3–0.5 cm/year) in the northern East-China Sea between 1984 and 2016 to the enhanced water transport through the Korea Strait into the Japan Sea. An increase of the East-China Sea water supply is the main reason of the increased temperature and decreased salinity, dissolved oxygen and pH in the surface (50 m depth) and intermediate layer (500 m depth) of the southern and central Japan Sea.*

*Key words:* Japan Sea, East-China Sea, sea level, dissolved oxygen concentration, pH.

Общая циркуляция поверхностных вод в южной и центральной частях Японского моря определяется Цусимским и Восточно-Корейским течениями, переносящими через Корейский пролив на север и северо-восток субтропические воды Восточно-Китайского моря. Большая часть субтропических вод проходит Японское море транзитом и выходит в Тихий океан через Сангарский пролив, меньшая следует вдоль западного побережья о-ва Хоккайдо и через прол. Лаперуза поступает в Охотское море [5]. Расход вод через Корейский пролив (глубина ~150 м) подвержен значительной внутригодовой изменчивости: наибольшие величины расхода вод наблюдаются в сентябре (3,2 Св, 1 Св = 10<sup>6</sup> м<sup>3</sup>/с), наименьшие – в январе (1,5 Св).

Начиная с середины 50-х годов прошлого века в Японском море фиксируются уменьшение содержания растворенного кислорода и увеличение температуры в глубинных и придонных слоях морской воды [9, 12, 16]. Значительные изменения происходят в динамике

---

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

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-10025).

морских экосистем и рыбных ресурсов [6, 20]. Уменьшение растворенного кислорода и увеличение температуры в глубинном и придонном слоях Японского моря принято связывать с повышением температуры воздуха в зимний период и снижением интенсивности и глубины проникновения зимней конвекции. Воды Японского моря обновляются шельфовыми водами Восточно-Китайского моря, формирующимися под влиянием Тайваньского течения, течения Куроиси и стока р. Янцзы. В летний и осенний периоды под воздействием речного стока и биологической активности на шельфе Восточно-Китайского моря воды приобретают повышенную стратификацию и низкие концентрации растворенного кислорода. Ранее нами было показано, что межгодовые изменения температуры и концентрации растворенного кислорода на горизонтах 500 и 1000 м в Японском море в период с 1963 по 2007 г. происходят за счет изменения поступления вод из Восточно-Китайского моря через Корейский пролив [1]. С 1978 по 2012 г. в центральной и южной частях Японского моря наблюдались тенденции к повышению температуры, росту содержания растворенного неорганического азота, понижению солёности и уменьшению неорганического фосфора в поверхностном слое вод (горизонт 50 м), связанные с усилением влияния прибрежных вод Восточно-Китайского моря на воды Японского моря [2]. Увеличением адвекции субтропических вод в район южного Приморья можно объяснить повышение численности тропических и субтропических видов животных и рыб в северо-западной части Японского моря [4]. Массовое появление рыб и моллюсков субтропического происхождения в Татарском проливе осенью 2011–2012 гг. может быть объяснено усилением поступления субтропических вод в северную часть Японского моря [3]. Механизмы и пути проникновения субтропических вод в субарктическую часть Японского моря показаны в работе [18].

В настоящей работе с использованием данных об уровне моря и результатов судовых наблюдений установлены причины значительной межгодовой изменчивости температуры, солёности, концентрации растворенного кислорода и pH в поверхностном и промежуточном слоях Японского моря в период с 1977 по 2016 г. Для анализа привлекались спутниковые данные об уровне моря (абсолютные величины, база данных AVISO – <http://www.aviso.altimetry.fr>) и результаты измерений уровня моря на прибрежных мареографных станциях Японского и Восточно-Китайского морей (интервал осреднения – 1 мес.), предоставленные Центром данных наблюдений за уровнем моря (Лаборатория океанографии Праудмэна, Великобритания). Разность уровней между субтропической и субарктической областями северо-западной части Тихого океана определяет разность уровней между Корейским и Сангарским проливами и объем поступления вод через Корейский пролив [17]. Расход вод через Корейский пролив оценивался по разности уровней между станциями Хаката/Кария (Корейский пролив) и Хакодате (Сангарский пролив) с использованием результатов измерений расходов вод за период с 1997 по 2007 г. [1, 2]. Исследования межгодовых изменений характеристик морской воды основываются на экспедиционных данных о температуре, солёности, концентрации растворенного кислорода и pH за период с 1977 по 2016 г., предоставленных Центром океанографических данных Японии (JODC). Для приведения значений pH к одной шкале величины, полученные в шкале NBS (1985–1996 гг.), пересчитывались в шкалу Total hydrogen scale (pH<sup>T</sup>) с использованием констант диссоциации угольной и борной кислот [15] и измерений общей щёлочности.

### **Межгодовые изменения уровня моря**

По сгущению изолиний уровня моря (рис. 1а) в Тихом океане выделяется течение Куроиси, переносящее на северо-восток субтропические воды вдоль западной границы Восточно-Китайского моря и побережья Японии. В юго-восточной и юго-западной частях Японского моря наблюдаются соответственно Цусимское и Восточно-Корейское течения. На широте 37–39° с.ш. Восточно-Корейское течение отделяется от побережья Корейского

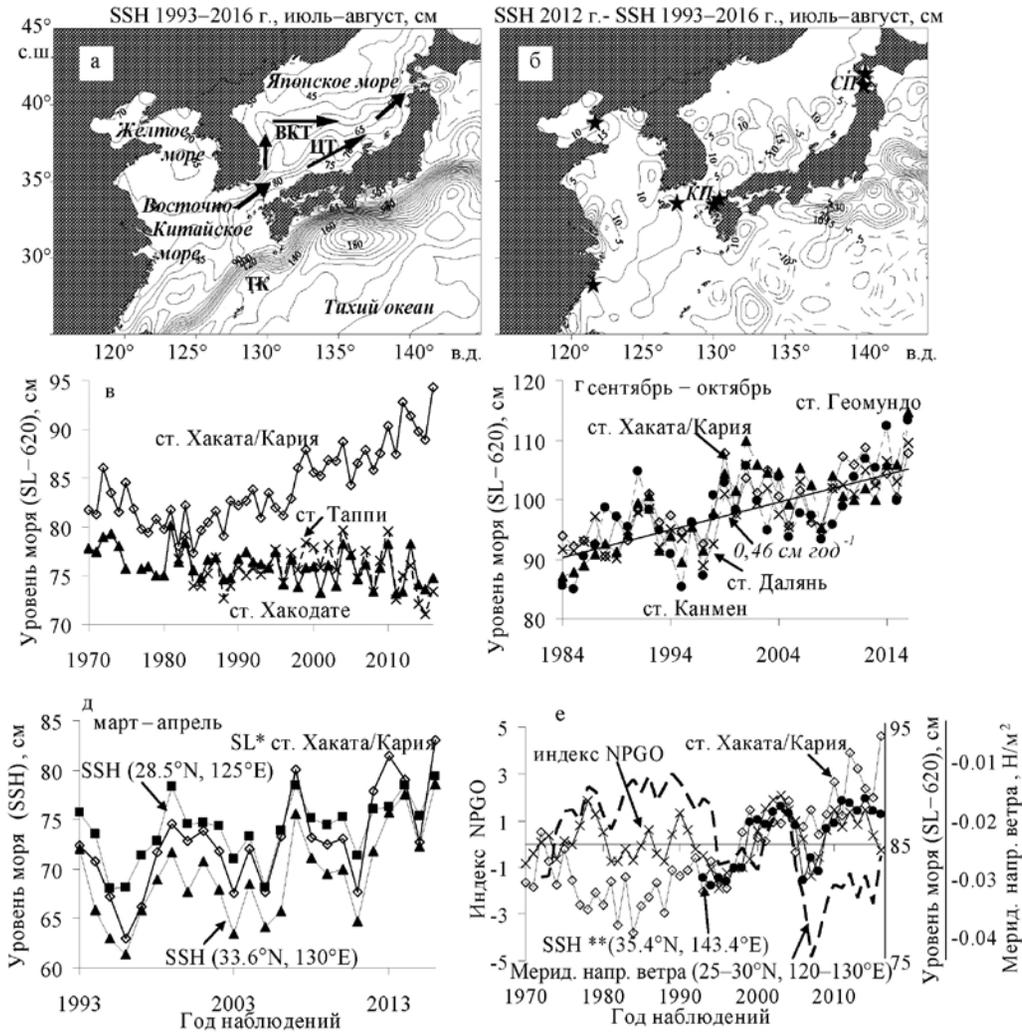


Рис. 1. Распределение уровня моря по данным спутниковой альтиметрии (SSH) в июле–августе 1993–2016 гг. (а) и разность уровня моря между 2012 г. и средним за период с 1993 по 2016 г. (б): ВКТ – Восточно-Корейское течение, ТК – течение Куроисио, ЦТ – Цусимское течение, КИ – Корейский пролив, СИ – Сангарский пролив. Стрелками на рис. 1а показано направление движения вод, звездочками на рис. 1б – расположение береговых мареографных станций: Канмен (28,1° с.ш., 121,3° в.д.), Геомундо (33,2° с.ш., 127,3° в.д.), Кария (33,5° с.ш., 129,8° в.д.), Хаката (33,6° с.ш., 130,4° в.д.), Далянь (38,9° с.ш., 121,7° в.д.), Таппи (41,2° с.ш., 140,4° в.д.), Хакодагате (41,8° с.ш., 140,7° в.д.). в–д – межгодовые изменения уровня моря на прибрежных мареографных станциях (SL) и в открытых частях Восточно-Китайского и Японского морей (SSH),  $SL^* = SL - 621$ , см. е – межгодовые изменения уровня моря (ст. Хаката/Кария и Тихий океан), NPGO-индекса (со сдвигом по времени 2 года) и меридионального напряжения ветра (май–сентябрь),  $SSH^{**} = SSH/9 + 692$ , см

полуострова и направляется на восток к Сангарскому проливу, формируя субарктический фронт, разделяющий субтропический и субарктический сектора Японского моря.

В работе [17] на основании модельных расчетов было показано, что разность уровней между Корейским и Сангарским проливами и расход вод через Корейский пролив определяются разностью уровней между субтропической и субарктической областями северо-западной части Тихого океана. Возрастание (понижение) разности уровней между станциями Хаката/Кария и Хакодагате приводит к увеличению (уменьшению) расхода вод через Корейский пролив [1, 2]. С 1984 по 2016 г. среднегодовой уровень моря на станции Хаката/Кария повысился на 17 см (рис. 1в), а уровень моря на станции Хакодагате не показывал

статистически значимых изменений, что свидетельствует об увеличении поступления вод в Японское море через Корейский пролив. Межгодовые изменения уровня моря в Корейском проливе (станция Хаката/Кария) хорошо согласуются с межгодовыми изменениями уровня моря на прибрежных станциях в Желтом и Восточно-Китайском морях:  $r = 0,73-0,92$  (рис. 1з). С 1984 по 2016 г. для января–февраля, марта–апреля, мая–июня, июля–августа, сентября–октября (рис. 1з) и ноября–декабря среднегодовой прирост уровня моря составил 0,3–0,5 см. Межгодовые изменения уровня моря на прибрежных мареографных станциях могут быть связаны с подвижками дна. Сравнение межгодовых вариаций уровня моря на прибрежных станциях с данными спутниковой альтиметрии (рис. 1д) показало их хорошую согласованность ( $r = 0,89-0,93$ ). В работах [14, 19] высказано предположение, что указанные изменения уровня моря вызваны продвижением аномалий уровня моря из центральной части тихоокеанских субтропиков к западному побережью Японии (волна Россби, распространяющаяся с востока на запад вдоль  $35^\circ$  с.ш.) и далее по часовой стрелке вдоль побережья Японии (волна Кельвина).

Формирование аномалий уровня моря и температуры в центральной части тихоокеанских субтропиков обусловлено усилением (ослаблением) Алеутской депрессии и Гавайского максимума и изменением положения их центров и, как следствие, изменением интенсивности западного ветрового переноса [8]. Возникающие при этом аномалии уровня моря и температуры могут быть представлены NPGO-индексом (North Pacific Gyre Oscillation). Поступление аномалий из района формирования к западному побережью Японии занимает 2–3 года. На рис. 1б показана аномалия уровня моря (40–50 см) вблизи западного побережья Японии в 2012 г. Наблюдается высокая корреляция ( $r = 0,80$ ) между изменением уровня моря в Тихом океане по данным спутниковой альтиметрии и NPGO-индексом (со сдвигом два года) в 1993–2016 гг. (рис. 1е). Однако изменениями NPGO-индекса нельзя объяснить межгодовые вариации уровня моря и наличие тенденции к повышению уровня моря в Восточно-Китайском море и в районе Корейского пролива (станция Хаката/Кария) в период с 1970 по 2016 г.

С мая по сентябрь Восточно-Китайское море находится под воздействием летнего муссона (ветра северного направления), способствующего адвекции вод Южно-Китайского и Восточно-Китайского морей на север к Корейскому проливу. Тенденцией к усилению летнего муссона (меридиональное напряжение ветра становится отрицательным – рис. 1е) и, как следствие, увеличением адвекции с юга вод с повышенными температурами можно объяснить современное повышение уровня моря в районе Корейского пролива ( $r = -0,65$ , 1970–2016 гг.).

### **Межгодовые изменения физических и химических параметров морской воды**

Распределения по глубине солёности, растворенного кислорода и рН в южной и центральной частях Японского моря в осенний период (рис. 2а, б) показывают наличие значительного вертикального градиента солёности (галоклин) и минимумов концентрации растворенного кислорода и рН в слое 50–150 м. Формирование поверхностного слоя вод южной части Японского моря происходит на шельфе Восточно-Китайского моря под влиянием вод Тайваньского течения, течения Курошио и стока р. Янцзы [1, 2]. Летом и осенью за счет прогрева поверхностных вод, увеличения стока р. Янцзы и высокой биологической продуктивности наблюдается значительное понижение содержания растворенного кислорода и рН в придонном слое внутреннего и центрального шельфа Восточно-Китайского моря. Увеличение поступления вод Восточно-Китайского моря через Корейский пролив летом и осенью должно приводить к повышению температуры, понижению солёности, концентрации растворенного кислорода и рН на подповерхностных горизонтах в южной и центральной частях Японского моря.

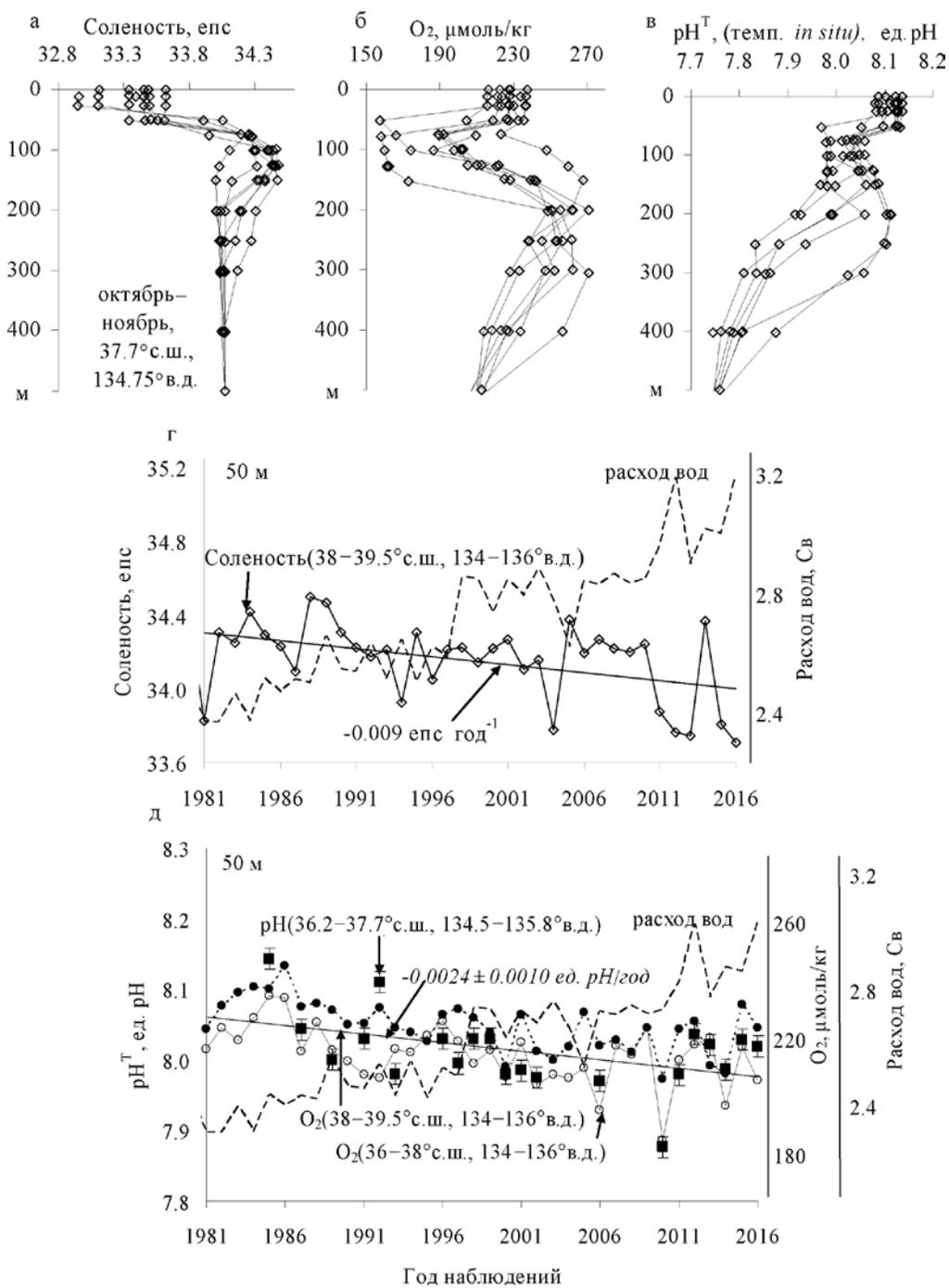


Рис. 2. Распределение по глубине солёности, концентрации растворенного кислорода и pH в Японском море (а–в); межгодовые изменения переноса вод через Корейский пролив и межгодовые изменения концентрации солёности (г), концентрации растворенного кислорода и pH (д) на горизонте 50 м в октябре–ноябре

На рис. 2в и 3 показаны межгодовые изменения концентрации растворенного кислорода, pH, температуры и солёности на горизонтах 50 и 500 м в центральной (39–41° с.ш.) и южной (36–39° с.ш.) областях Японского моря (октябрь–ноябрь) и расход вод через Корейский пролив.

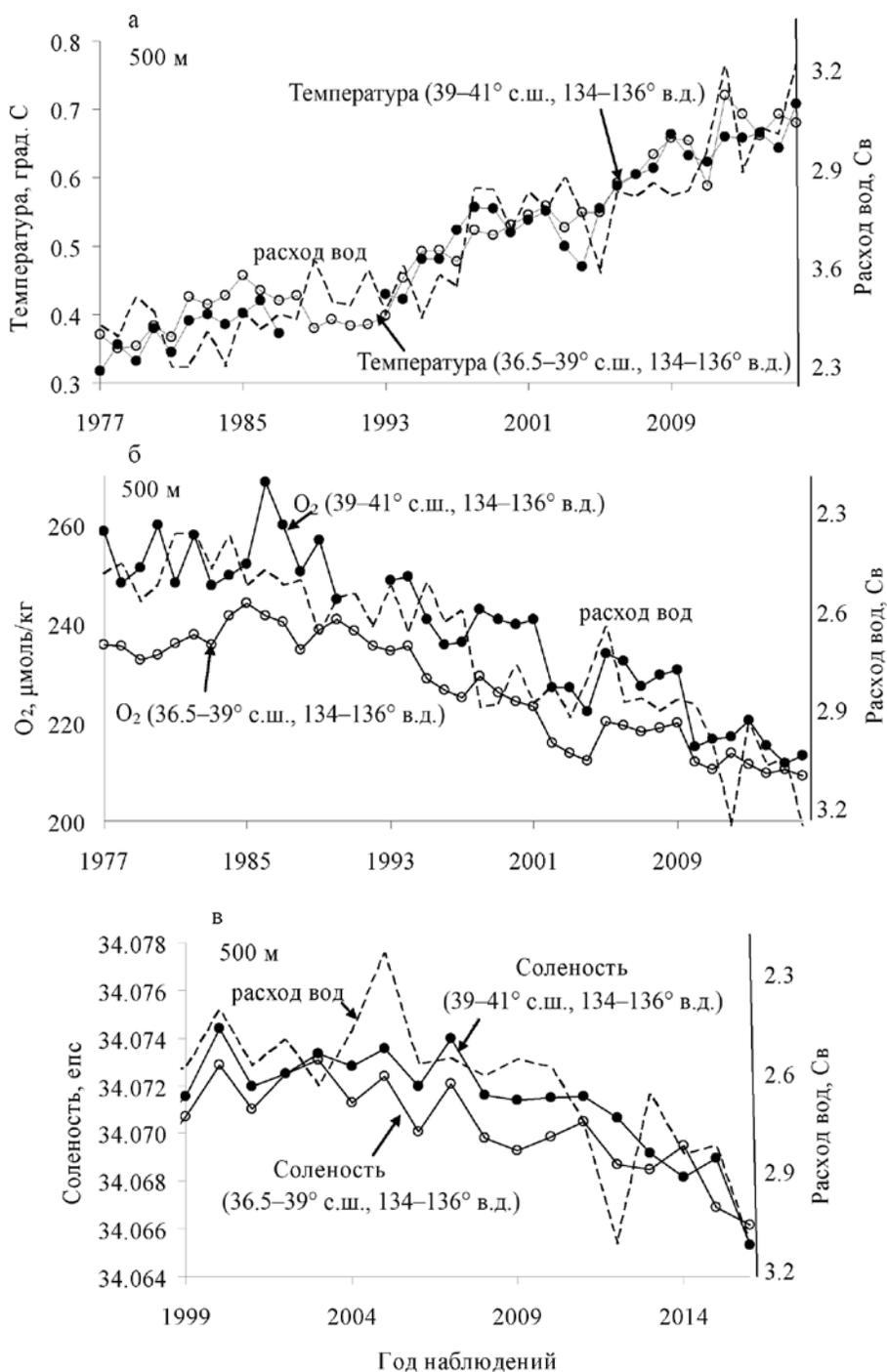


Рис. 3. Межгодовые изменения расхода вод через Корейский пролив и межгодовые изменения температуры (а), концентрация растворенного кислорода (б) и соленость (в) на горизонте 500 м в Японском море (октябрь–ноябрь)

На горизонте 50 м в центральной части Японского моря с начала 1980-х по 2016 г. наблюдалось понижение солености вод до  $0,009 \pm 0,003$  епс/год (рис. 2г). В центральной и южной областях содержание растворенного кислорода снижалось на  $0,8 \pm 0,2$  μмоль · кг<sup>-1</sup>/год. Происходила ацидификация – понижение рН морской воды до  $0,0024 \pm 0,001$  ед. рН/год

(рис. 2д). В настоящее время в субтропических и тропических областях Тихого и Атлантического океанов наблюдается понижение рН морской воды (0,0016 ед. рН/год) [10], вызванное ростом содержания углекислого газа в атмосфере. Понижение рН на горизонте 50 м в южной части Японского моря, по-видимому, обусловлено увеличением адвекции придонных шельфовых вод Восточно-Китайского моря через Корейский пролив.

На горизонте 500 м с 1984 по 2016 г. температура возросла на 0,3 °С, концентрация растворенного кислорода уменьшилась на 40  $\mu\text{моль/кг}$  (рис. 3а, б). Использование высокоточных измерений солености (0,001 епс) позволило обнаружить тенденцию к понижению солености в промежуточном слое вод в период с 1993 по 2016 г. (рис. 3в). Наблюдалась статистически значимая корреляция между межгодовыми изменениями температуры, концентрации растворенного кислорода и солености на горизонте 500 м в южной и центральной частях Японского моря и расходом вод через Корейский пролив ( $r = 0,89, -0,85, -0,78$ ). Тенденции к повышению температуры и понижению концентраций растворенного кислорода и неорганического фосфора в поверхностном слое вод Японского моря согласуются с трендами в изменении физических и химических параметров морской воды в соседних Желтом и Восточно-Китайском морях [13].

Источником растворенного кислорода для промежуточного слоя вод Японского моря служит поверхностный слой, где происходит обмен кислородом между морской водой и атмосферой и его продуцирование в процессе фотосинтеза. Увеличение концентрации растворенного кислорода в глубинных слоях происходит за счет вентиляции вод, а понижение – вследствие окисления органического вещества и дыхания организмов. Снижение этого показателя на горизонте 500 м связано с адвекцией низкокислородных вод из Восточно-Китайского моря, а также с увеличением первичной продукции в поверхностном слое и, как следствие, ростом экспорта органического вещества на глубину. Наблюдения, проводимые в Японском море, не показывают увеличения биомассы фитопланктона (концентрации хлорофилла) и роста биологической продуктивности вод [2, 11]. Вентиляция промежуточного слоя вод происходит в зоне субарктического фронта и определяется температурой и ветровым режимом в зимний период [7]. Нами не выявлено статистически значимых зависимостей между температурой воздуха в зимний период и снижением концентрации растворенного кислорода на горизонте 500 м. Следовательно, увеличение адвекции вод из Восточно-Китайского моря следует рассматривать как основной фактор повышения температуры, понижения солености и концентрации растворенного кислорода на горизонте 500 м в южной и центральной частях Японского моря.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев А.Г. Межгодовая изменчивость расхода вод через Корейский/Цусимский пролив и ее влияние на содержание растворенного кислорода в водах Японского моря // Метеорол. и гидрология. 2010. № 9. С. 74–85.
2. Андреев А.Г. Межгодовые изменения параметров морской воды и концентрации хлорофилла-а в Японском море в осенний период // Метеорол. и гидрология. 2014. № 8. С. 55–65.
3. Андреев А.Г. Особенности циркуляции вод в южной части Татарского пролива // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 1. С. 1–9.
4. Никитин А.А., Лобанов В.Б., Данченков М.А. Возможные пути переноса субтропических вод в район Дальневосточного морского заповедника // Изв. ТИНРО. 2002. Т. 131. С. 41–53.
5. Юрасов Г.И., Яричин В.Г. Течения Японского моря. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 1991. 174 с.
6. Chiba S., Saino T. Interdecadal change in the upper water column environment and spring diatom community structure in the Japan Sea: an early summer hypothesis // Mar. Ecol. Progr. Ser. 2002. Vol. 231. P. 23–35.
7. Clayson C.A., Luneva M. Deep convection in the Japan (East) Sea: A modeling perspective // Geophys. Res. Lett. 2004. Vol. 31. L17303. – DOI: 10.1029/2004GL020497.
8. Di Lorenzo E. et al. North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change // Geophys. Res. Lett. 2008. Vol. 35. L08607. – DOI: 10.1029/2007GL032838.
9. Gamo T., Nozaki Y., Sakai H. et al. Spatial and temporal variations of water characteristics in the Japan Sea bottom layers // J. Mar. Res. 1986. Vol. 44. P. 781–793.

10. Ishii M., Kosugi N., Sasano D. et al. Ocean acidification off the south coast of Japan: A result from time series observations of CO<sub>2</sub> parameters from 1994 to 2008 // *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116. C06022. – DOI: 10.1029/2010JC006831.
11. Joo H.T., Son S.H., Park J.-W. Long-Term Pattern of Primary Productivity in the East/Japan Sea Based on Ocean Color Data Derived from MODIS-Aqua // *Remote Sens. Environ.* 2016. Vol. 8 (25). – DOI: 10.3390/rs8010025.
12. Kim K., Kim K.-R., Kim Y.-G. et al. Water mass and decadal variability in the East Sea (Sea of Japan) // *Progr. Oceanogr.* 2004. Vol. 61. P. 157–174.
13. Lin C., Ning X., Su J. et al. Environmental changes and the responses of the ecosystems of the Yellow Sea during 1976–2000 // *J. Mar. Systems.* 2005. Vol. 55. P. 223–234.
14. Ma C., Yang J., Wu D., Lin X. The Kuroshio Extension: a leading mechanism for the seasonal sea-level variability along the west coast of Japan // *Ocean Dynamics.* 2010. Vol. 60. P. 667–672.
15. Millero F.J. The thermodynamics of the carbon dioxide system in the ocean // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1995. Vol. 59. P. 661–677.
16. Minami H., Kano Y., Ogawa K. Long-term variations of potential temperature and dissolved oxygen of the Japan Sea Proper Water // *J. Oceanogr.* 1999. Vol. 55. P. 197–206.
17. Ohshima K. The flow system in the Japan Sea caused by a sea level difference through the shallow straits // *J. Geophys. Res.* 1994. Vol. 99. P. 9925–9940.
18. Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu. Statistical analysis of Lagrangian transport of subtropical waters in the Japan Sea based on AVISO altimetry data // *Nonlinear Processes in Geophysics.* 2017. Vol. 24. P. 89–99.
19. Sasaki Y.N., Minobe S., Miura Y. Decadal sea-level variability along the coast of Japan in response to ocean circulation changes // *J. Geophys. Res.* 2014. Vol. 119. P. 266–275.
20. Zhang C.I., Lee J.B., Seo Y.I. et al. Variations in the abundance of fisheries resources and ecosystem structure in the Japan/East Sea // *Progr. Oceanogr.* 2004. Vol. 61. P. 245–265.