2019 Tom 196

УДК 551.468.6

П.Ю. Семкин¹, П.Я. Тищенко¹, В.Б. Лобанов¹, Ю.А. Барабанщиков¹, Т.А. Михайлик², С.Г. Сагалаев¹, П.П. Тищенко^{1*}

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43;

² Государственный научно-исследовательский институт озерного и речного рыбного хозяйства им. Л.С. Берга, 199053, г. Санкт-Петербург, набережная Макарова, 26

ОБМЕН ВОД В ЭСТУАРИИ РЕКИ РАЗДОЛЬНОЙ (АМУРСКИЙ ЗАЛИВ, ЯПОНСКОЕ МОРЕ) В ПЕРИОД ЛЕДОСТАВА

В зимний сезон зона смешения в микроприливном эстуарии р. Раздольной представляет собой клин осолоненных вод с градиентом солености более 20 % на 1 м, проникновение которого составляет 28 км от устьевого бара реки, что согласуется с предыдущими исследованиями В.И. Звалинского с соавторами (2016). Установлено, что во всем слое вод зоны смешения наблюдаются реверсивные течения с изменением направления в зависимости от фазы прилива. В период отливной фазы и прямого течения (в направлении моря) зафиксировано периодическое внутрисуточное повышение солености и температуры воды у дна, при этом величина последней превышала 2 °C на расстоянии 20-24 км от устьевого бара реки. Толщина льда в районе формирования вод с повышенной температурой уменьшалась до 20 см, в то время как вдоль всей зоны смешения она была от 40 до 70 см, что свидетельствует о постоянном потоке тепла от дна в данном районе в период ледостава. На основании расчетов, основанных на результатах измерений течений, установлено, что объем прямого потока осолоненной воды из эстуария превышает объем обратного потока морской воды в эстуарий на величину 6,6 · 103 м3 за сутки. Одновременное формирование придонных вод с повышенной температурой и соленостью у дна при прямых течениях и избыточный поток осолоненных вод из эстуария в море с расходом за сутки 0,08-0,16 м³/с свидетельствует о наличии источника этих вод в верхней части эстуария. Формирование этого источника объясняется разгрузкой грунтовых вод, проникающих со стороны моря через водоносный горизонт.

^{*} Семкин Павел Юрьевич, научный сотрудник, e-mail: pahno@list.ru; Тищенко Павел Яковлевич, доктор химических наук, заведующий лабораторией, e-mail: tpavel@poi.dvo.ru; Лобанов Вячеслав Борисович, кандидат географических наук, директор института, e-mail: lobanov@poi.dvo.ru; Барабанщиков Юрий Александрович, младший научный сотрудник, e-mail: biw90@mail.ru; Михайлик Татьяна Александровна, ученый секретарь, e-mail: tatyana.mikhay-lik.00@mail.ru; Сагалаев Сергей Григорьевич, научный сотрудник, e-mail: sagalaev@poi.dvo.ru; Тищенко Петр Павлович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, e-mail: eq15@poi.dvo.ru.

Semkin Pavel Yu., researcher, e-mail: pahno@poi.dvo.ru; Tishchenko Pavel Ya., D.Chem., head of laboratory, e-mail: tpavel@poi.dvo.ru; Lobanov Vyacheslav B., Ph.D., director, e-mail: lobanov@poi.dvo.ru; Barabanshchikov Yury A., junior researcher, e-mail: biw90@mail.ru; Mikhailik Tatyana A., scientific secretary, e-mail: tatyana.mikhaylik.00@mail.ru; Sagalaev Sergey G., researcher, e-mail: sagalaev@poi.dvo.ru; Tishchenko Petr P., Ph.D., leading researcher, e-mail: ek15@poi.dvo.ru.

Ключевые слова: эстуарий, проникновение морских вод, зона смешения, течения, влияние льда, приливы, суточная изменчивость, расход реки, водоносный горизонт, поток грунтовых вод, река Раздольная.

DOI: 10.26428/1606-9919-2019-196-123-137.

Semkin P.Yu., Tishchenko P.Ya., Lobanov V.B., Barabanshchikov Yu.A., Mikhailik T.A., Sagalaev S.G., Tishchenko P.P. Water exchange in the estuary of the Razdolnaya River (Amur Bay, Japan Sea) in the ice covered period // Izv. TINRO. — 2019. — Vol. 196. — P. 123–137.

Environmental conditions in the Razdolnaya/Suifen Estuary and adjacent marine area were monitored from 2008 to 2018, by seasons, including winter observations in January 2014 and January 2018. The river discharge in winter was low: 6 m³/s (mean annual discharge is 73 m³/s). The estuary was covered by ice. The cline of salt water at the bottom was traced upstream up to 28 km from the river mouth. The currents in the estuary changed in tidal cycle. Increasing of salinity and temperature (> 2°) at the bottom was observed in the distance 20–24 km from the river bar (this area was distinguished by relatively thin ice, 20 cm, against 40–70 cm in the rest of estuary). Modeling of the water balance in the estuary showed an additional source of salt water in the internal estuary, beyond the direct exchange with the sea over the river bar, that was presumably the water flow through the aquifer. This groundwater discharge was responsible for supporting of the salted bottom layer and for temperature and salinity increasing in the internal estuary during the ebb phase in conditions of limited water exchange by two-layered estuarine circulation because of ice cover at the river mouth.

Key words: estuary, cline of salt water, estuarine mixing zone, estuarine circulation, ice cover, tide, daily variation, river discharge, submarine groundwater discharge, Razdolnaya/Suifen River.

Введение

Проникновение осолоненных вод в эстуарии и в прибрежные подземные водоносные горизонты — это параллельные, многофакторные процессы [Симонов, 1969; Михайлов, 1997; Михайлова, 2013; Lu et al., 2013; Robinson et al., 2016], представляющие в настоящее время серьезную проблему для населения городов, расположенных на побережьях [Werner et al., 2013]. Однако этот процесс формирует специфические экосистемы [Хлебович, 1974], которые находятся в числе первых по значимости для населения планеты [Costanza et al., 1997]. Гидрология эстуариев Дальнего Востока России изучена очень слабо. В настоящее время есть сведения об отдельных объектах Камчатки [Горин, 2012], Сахалина [Кафанов и др., 2003] и материкового побережья Охотского моря [Кравцов, 1980; Гидрология..., 1989; Горин и др., 2015; Коваль и др., 2017], однако все эти объекты находятся под воздействием значительных приливов. Микроприливные эстуарии сосредоточены на побережье Приморского края — наиболее освоенного с хозяйственной точки зрения региона Дальнего Востока РФ [Шулькин, Семыкина, 2012]. В Японском море исследование гидрологии микроприливных эстуариев ограничено изучением изменчивости речного стока, его объема, температуры и солености как факторов экосистемы при изучении биогеохимических процессов для побережья Японии [Kasai et al., 2010; Watanabe et al., 2014] и для побережья Приморского края РФ [Звалинский и др., 2005, 2010, 2016; Тищенко и др., 2005, 2017, 2018; Колпаков и др., 2010; Семкин и др., 2012, 2018; Важова, Зуенко, 2015]. В отличие от эстуариев японского побережья, где в зимний сезон в водном режиме рек выделяются половодья [Funahashi et al., 2013], эстуарии Приморского края в это время года покрываются толстым ледяным покровом, динамика вод под которым в зоне смешения не изучена до настоящего времени. Прямые измерения течений подо льдом и в период открытой воды в эстуарии р. Партизанской Приморского края, впервые представленные в работе П.Ю. Семкина с соавторами [в печати], показали, что гидрология эстуариев Приморского края в период ледостава имеет ряд особенностей. Одна из особенностей — затрудненный водообмен на перекатах эстуария в результате льдообразования и, как результат, — длительный период времени нахождения осолоненных вод в придонном слое зоны смешения. Изучение проникновения морских вод в эстуарий трансграничной р. Раздольной, водосбор которой в основном находится на территории

Китайской Народной Республики (КНР), особенно актуально в настоящее время из-за растущего спроса на водные ресурсы на площади водосбора реки в КНР и Приморском крае РФ в связи с ростом населения и урбанизацией, что может привести к изменению гидрологического режима эстуария в будущем.

Цель статьи — описать структуру и динамику вод в эстуарии р. Раздольной в период ледостава на основе гидрологических данных, полученных зимой 2014 и 2018 гг.

Материалы и методы

Приморский край расположен в муссонной области умеренных широт. Зима в Приморье отличается сравнительно низкими температурами. Средняя многолетняя температура воздуха на южном побережье края в январе составляет минус $10,6\,^{\circ}$ С. Самый теплый месяц — август, со среднемесячной температурой $20,9\,^{\circ}$ С. Среднемноголетняя норма осадков для района исследований составляет $794\,$ мм/год. С июня по август выпадает $42,7\,^{\circ}$ 6 годовой нормы осадков, а в период с апреля по октябрь около $84,0\,^{\circ}$ 6, т.е. в холодный период года — не более $16,0\,^{\circ}$ 8.

Река Раздольная (Суйфун) начинается на территории Китая (северная Маньчжурия) и входит в пределы Российской Федерации вблизи с. Полтавка. Площадь водосбора р. Раздольной $16830~{\rm km}^2$, на территории России $7300~{\rm km}^2$, протяженность на этом участке равна $192~{\rm km}$. Среднемноголетний расход реки $72~{\rm m}^3/{\rm c}$. В водном режиме р. Раздольной выделяется зимняя межень с речным расходом $2-7~{\rm m}^3/{\rm c}$, весеннее половодье в мае, а также дождевые паводки в летние и осенние месяцы. Максимумы весенних половодий приблизительно в десять раз превосходят средний годовой расход реки и могут превышать $800~{\rm m}^3/{\rm c}$. Абсолютные максимумы расхода в период паводков летом и осенью превышают $1800~{\rm m}^3/{\rm c}^{**}$.

По многолетним данным** равномерное понижение температуры воды в осенние месяцы сопровождается переходом через $0,2\,^{\circ}\mathrm{C}$ 18 ноября. Начало ледостава на посту в с. Тереховка обычно наблюдается в конце ноября. Река освобождается ото льда в среднем 9 апреля. Согласно многолетним данным средняя дата прохождения температуры воды весной через $0,2\,^{\circ}\mathrm{C}$ в районе поста в с. Тереховка — 6 апреля. После этого температура воды равномерно растет до конца июля — начала августа. Наибольшая среднегодовая температура воды летом — $27\,^{\circ}\mathrm{C}^{**}$.

В приемном бассейне р. Раздольной, в Амурском заливе (рис. 1), наблюдаются неправильные полусуточные приливы. Средняя величина сизигийного прилива в зал. Петра Великого колеблется от 15 до 20 см [Подорванова и др., 1989], что позволяет отнести эстуарий р. Раздольной к микроприливным эстуариям [Davis, 1964]. Соленость и температура воды Амурского залива изменяются в широких диапазонах в зависимости от сезона. В зимний период соленость достигает максимальных значений (более 34 %), при этом происходят интенсивное охлаждение вод и льдообразование. Граница припайных льдов для февраля 2018 г. показана на рис. 1.

В статье анализируются результаты комплекса суточных измерений, проведенных с 23 по 24.01.2014 г., при расходе реки 6 м³/с. При этом в ходе полевых работ измерялись течения подо льдом с использованием четырех электромагнитных измерителей Infinity фирмы JFE Advantech Co., соединенных последовательно в состав автономной буйковой станции в заякоренном режиме. Станцию устанавливали на глубине 4 м выше лимана (рис. 1). Параллельно с измерениями течений измерялся уровень воды с использованием датчиков давления на мультипараметрических зондах WQM (Water Quality Monitor) фирмы Wet Labs, установленном на дне эстуария на глубине 7 м, и RBR (фирма RBR Ltd.), установленном на глубине 100 м в зал. Петра Великого (рис. 1). Также с использованием зонда SBE–19 (фирма Seabird Electronics) проводились

^{*} Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3: Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 26: Приморский край. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 416 с.

^{**} Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1: РСФСР. Вып. 21: Бассейны Уссури и рек Японского моря. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 387 с.

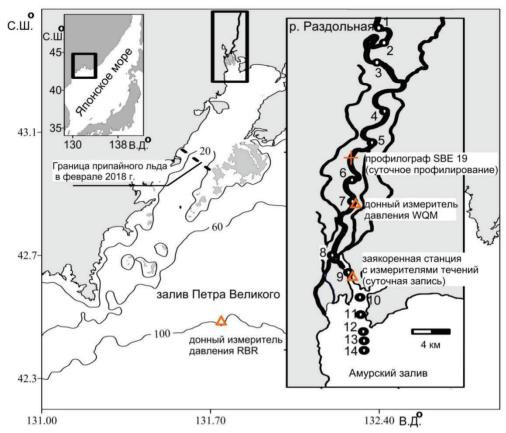


Рис. 1. Географическое положение района и схема станций: \bullet — станции зондирования с использованием профилографа Rinko profiler 24.02.2018; Δ — измерители давления WQM (координаты 43°24,068° с.ш. 131°48,514° в.д.) и RBR (координаты 42°30,652° с.ш. 131°47,631° в.д.), измерители течений Infinity (координаты 43°20,192° с.ш. 131°48,158° в.д.) в заякоренном режиме 23.01.2014 г.; + — станция внутрисуточного зондирования с использованием профилографа SBE–19 23–24.01.2014 г. (координаты 43°25,760° с.ш. 131°48,559° в.д.)

Fig. 1. Scheme of the studied area: + — station of daily profiling on January 23–24, 2014; $\overline{\bullet}$ — stations with CTD-profiling on February 24, 2018; Δ — sea level and current meters (pressure sensors in 43°24,068' N, 131°48,514' E and 42°30,652' N, 131°47,631' E, current meters in 43°20,192' N, 131°48,158' E)

измерения температуры и солености в зоне смешения (рис. 1) с периодичностью 3 ч в течение одних суток. Кроме того, для анализа были привлечены результаты СТД-профилирования, выполненные 24.02.2018 г. с использованием зонда Rinko profiler фирмы JFE Advantech Co. за 4 ч (рис. 1).

Результаты и их обсуждение

Динамика и структура вод

В период наших наблюдений 23–24 января 2014 г., согласно архивным данным метеостанции г. Владивосток, температура воздуха в течение суток была в диапазоне от минус 3,8 до минус 12,3 °C. Направление ветра менялось с южного на северное, его средняя скорость была 2–6 м/с [https://rp5.ru/Apxив погоды во Владивостоке].

Приливы в зал. Петра Великого и в эстуарии р. Раздольной были сравнимы по величине. Коэффициент прилива для района постановки WQM составлял около 1,0 ($K_{np} = B_{_T}/B_{_M}$, где $B_{_T}$ — величина прилива в данной точке, $B_{_M}$ — величина прилива в море) и приблизительно с двухчасовым отставанием в фазе волны (рис. 2, а). Отставание в фазах приливов в результате растущего трения на пути приливной

волны характерно для эстуариев [Михайлов, Даценко, 1973]. Судя по резкому изменению характера руслового рельефа в районе ст. 3 на расстоянии 28 км от устьевого бара (во всем створе реки песчаный перекат, промерзающий льдом до дна), именно этот район является вершиной эстуария, выше которого влияние моря, как правило, не прослеживается.

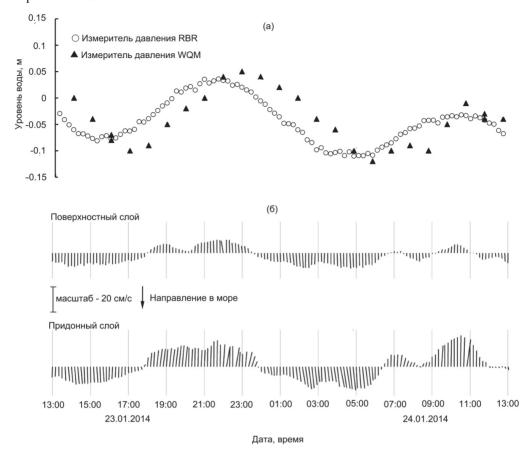


Рис. 2. Внутрисуточная изменчивость уровня воды в зал. Петра Великого (RBR) и в зоне смешения эстуария р. Раздольной (WQM) ($\bf a$) и течений ($\bf \delta$) в поверхностном и придонном слоях воды в реке в 5 км выше устьевого бара 23–24.01.2014 г. Расход реки 6 м³/с

Fig. 2. Daily variations of the sea level in Peter the Great Bay and in the Razdolnaya/Suifen Estuary (a) and currents in the surface and bottom layers of the estuary in 5 km upstream from the mouth ($\mathbf{6}$) on January 23–24, 2014 (river discharge 6 m³/s)

Приливы создают существенную внутрисуточную изменчивость течений (рис. 2, б). В условиях зимней межени в поверхностном и придонном горизонтах наблюдалась регулярная смена направления течения в зависимости от фазы прилива. Во время приливной фазы течение во всем слое воды со скоростью до 25 см/с было ориентировано в направлении реки, во время отливной фазы и в малые воды течение во всем слое воды со скоростью до 20 см/с было направлено в сторону моря.

Расход реки в период проведения исследований составлял 6 м³/с. В условиях покрытия акватории льдом отсутствует ветровое перемешивание, что обычно приводит к накоплению пресных вод в эстуарии, даже несмотря на малый расход реки [Скриптунов, 1976]. Для микроприливных эстуариев при этом характерна двухслойная структура вод с высокой устойчивостью слоев [Михайлов, Горин, 2012], что наблюдалось и в ходе наших исследований в районе постановки станции с измерителями течений (рис. 3), где вертикальный градиент солености составлял около 20 ‰ на 1 м.

Особенность временной изменчивости температуры, которая, несмотря на наличие ледяного покрова, у дна была положительная, и солености в придонном слое

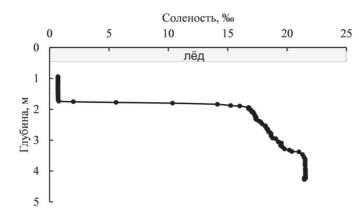


Рис. 3. Вертикальный профиль солености воды на 5 км выше от устьевого бара в районе постановки измерителей течений Infinity 23.01.2014 г.

Fig. 3. Vertical profile of salinity in 5 km upstream from the mouth on 23 January 2014

вод состоит в том, что в течение суток в районе станции зондирования профилографом SBE—19 в отливную фазу (полные воды (ПВ) + 3 часа (в 15:00 23 и 24 января)) наблюдалось заметное повышение этих характеристик (см. таблицу), т.е. температура и соленость воды повышались, когда поток придонной воды в течение трех часов был ориентирован в направлении моря (см. рис. 2). Этот результат свидетельствует о том, что в верхней части эстуария существовал источник воды с повышенными температурой и соленостью, период появления которой соответствует приливному циклу. Таким источником может быть разгрузка грунтовых вод (submarine groundwater discharge — SGD) из водоносных слоев, которая имеет значение в процессах обмена водами и веществом между сушей и морем [Вurnet et al., 1990; Santos et al., 2014; Wang et al., 2014]. Для прибрежной области процесс проникновения морских вод в подземные водоносные горизонты наглядно продемонстрирован в лабораторных и модельных экспериментах [Lu et al., 2013].

Внутрисуточная изменчивость солености и температуры в придонном слое вод по результатам суточного профилирования с использованием зонда SBE–19 с 23 по 24.01.2014 г. (18 км от устьевого бара реки)

Variations of water salinity and temperature in the bottom layer in 18 km upstream from the mouth on January 23–24. 2014

Показатель	Время, час							
	15:00	18:00	21:00	0:00	6:00	9:00	12:00	15:00
Соленость в придонном слое воды, ‰	25,42	24,55	24,34	24,38	24,49	24,72	24,17	25,84
Температура в придонном слое воды, °С	1,52	1,44	1,47	1,46	1,42	1,49	1,46	1,60

Распределение температуры воды и концентрации хлорофилла а вдоль зоны смешения в профиле наибольших глубин (рис. 4), полученное в феврале 2018 г. за период около 4 ч, наглядно демонстрирует район возможного выхода грунтовых вод, расположенный на расстоянии 20–24 км от устьевого бара реки (ст. 4, 5), а также на ст. 6, однако менее выраженно. Также в ходе этих работ была установлена вторая область разгрузки грунтовых вод, в районе ст. 2, где толщина льда была не более 5,0 см с проталинами диаметром около 0,5 м на протяжении 300,0 м вдоль русла реки. Аналогично и в районе обнаружения вод с повышенной температурой у дна в зоне смешения на ст. 6 толщина льда была наименьшей (снижалась до 20 см) по сравнению с толщиной льда на протяжении всей зоны смешения. Максимальная толщина речного и морского льда достигала соответственно 80 и 70 см (рис. 4).

Оценка потока грунтовых вод

Оценка потока грунтовых вод (V_{sw}^{SGD}) , поступающих во внутренний эстуарий, основана на расчете «избыточного потока» осолоненных вод, вытекающих из эстуария за сутки. Объем «избыточного потока» рассчитан из данных по течениям прямого направления — из эстуария в море (индекс «out») и обратного течения (индекс «in»)

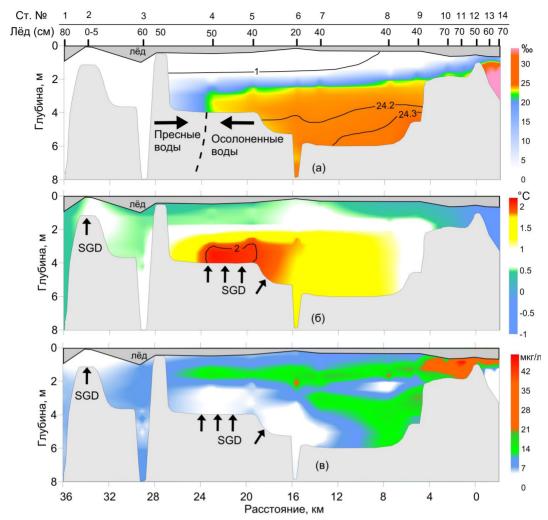


Рис. 4. Вертикальное распределение солености (a), температуры (б) и концентрации хлорофилла а (в) по результатам зондирования в продольном профиле наибольших глубин внутреннего эстуария р. Раздольной 24.02.2018 г. при расходе реки 6 м³/с. Пунктиром в осадке схематично обозначена гипотетическая фронтальная область между пресными и осолоненными грунтовыми водами; стрелками — предполагаемый поток грунтовых вод (submarine groundwater discharge — SGD)

Fig. 4. Water temperature, salinity and chlorophyll *a* concentration along the section along the maximal depths in the Razdolnaya/Suifen Estuary on February 24, 2018 (river discharge 6 m³/s). Distance is measured from the river mouth. Hypothetical frontal zone between the fresh and saline groundwaters is shown by *dotted line*; supposed groundwater discharge is indicated by *arrows*

за одни сутгb через створ в районе постановки измерителей течений (43°20,192' с.ш. 131°48,158' в.д.):

$$V_{sw}^{SGD} = V_{sw}^{out} - V_{sw}^{in}.$$
 (1)

Величины V^{out} и V^{in} рассчитаны на основе величин расходов воды (Q) и продолжительности течений речных и солоноватых вод (T_r и T_{sw}):

$$V_{sw}^{in} = Q_{sw}^{in} \cdot T_{sw}^{in}; \quad V_{sw}^{out} = Q_{sw}^{out} \cdot T_{sw}^{out};$$

$$(2)$$

$$V_r^{in} = Q_r^{in} \cdot T_r^{in} ; V_r^{out} = Q_r^{out} \cdot T_r^{out}.$$

$$(3)$$

При расчете расходов речных и солоноватых вод через указанный створ ($Q_{_{\rm r}}$ и $Q_{_{\rm sw}}$) использовались средние скорости течений при прямых с индексом «out» и обратных с

индексом «in» течениях (U и U и и и площадь сечения речных и морских вод (S_r и S_{sw}):

$$Q_{sw}^{in} = S_{sw}^{in} \cdot U_{sw}^{in}; \ Q_{sw}^{out} = S_{sw}^{out} \cdot U_{sw}^{out};$$
 (4)

$$Q_r^{in} = S_r^{in} \cdot U_r^{in}; \ Q_r^{out} = S_r^{out} \cdot U_r^{out}. \tag{5}$$

По результатам зондирования через всю ширину створа в районе постановки измерителей течений зимой получаем: $S_{sw} = 40 \text{ m}^2, S_r = 120 \text{ m}^2.$

По результатам измерений течений в придонном слое воды средняя за сутки скорость приливного/отливного течения равна: $U_{sw}^{in} = 6.2$ см/с, $U_{sw}^{out} = 5.7$ см/с, расход воды соленостью 24,3 % за сутки: $Q_{sw}^{in} = 2.49$ м³/с, $Q_{sw}^{out} = 2.30$ м³/с. Продолжительность приливных/отливных течений для придонного слоя за сутки по данным измерений $T_{sw}^{in} \approx 11.5$ ч, $T_{sw}^{out} \approx 12.5$ ч, т.е. период действия прямого течения (отливного) превышает период действия обратного течения (приливного) приблизительно на 1 ч. Таким образом, за сутки для обратного течения $V_{sw}^{in} = 2.49 \text{ м}^3/\text{с} \cdot 39 \cdot 10^3 \text{ c} = 97110 \text{ м}^3$, для прямого течения $V_{sw}^{out} = 2.30 \text{ м}^3/\text{c} \cdot 45 \cdot 10^3 \text{ c} = 103727 \text{ м}^3$, согласно формуле (1) получаем: $V_{sw}^{SGD} = 103727 - 97110 = 6617 \text{ м}^3/\text{сут}$.

По результатам измерений течений в поверхностном слое воды средняя за сутки скорость приливного/отливного течения: $U_r^{in} = 3,24$ см/с, $U_r^{out} = 5,25$ см/с, расход воды соленостью 2 ‰ для приливного/отливного течений при среднесуточной скорости течения: $Q_r^{in}=3,89 \text{ m}^3/\text{c},\ Q_r^{out}=6,31 \text{ m}^3/\text{c}.\ Продолжительность приливных/отливных течений для поверхностного слоя за сутки из данных измерений: <math>T_r^{in}\approx 8,5 \text{ ч},\ T_r^{out}\approx 15,5 \text{ ч},$ т.е. период действия прямого течения (отливного) превышает период действия обратного течения (приливного) почти в 2 раза. Таким образом, за сутки для обратного течения $V_r^{in}=3,89~\text{m}^3/\text{c}\cdot 29,4\cdot 10^3~\text{c}=114436~\text{m}^3$, для прямого течения: $V_r^{out}=6,31~\text{m}^3/\text{c}\cdot 54,6\cdot 10^3~\text{c}=114436~\text{m}^3$ = 344543 м³, а общий объем выходящей в море речной воды в поверхностном слое из эстуария за сутки: $V_r^{\text{out}} - V_r^{\text{in}} = 230107 \text{ м}^3$. Зная объем речного стока по данным на станции в с. Тереховка для периода из-

мерений (6 M^3/c) — Q_r^T , получаем:

$$V_r^{in} = (Q_r^T - Q_r^{in}) \cdot T_r^{in}, \tag{6}$$

$$V_r^{\text{out}} = (Q_r^T + Q_r^{\text{out}}) \cdot T_r^{\text{out}}, \tag{7}$$

где Q_r^{in} — изменение расхода речной воды в точке наблюдения относительно расхода реки в Тереховке во время прилива; Q_r^{out} — изменение расхода речной воды в точке наблюдения относительно расхода реки в Тереховке во время отлива.

Из соотношений полученных оценок следует, что:

$$Q_{r}^{out'} = Q_{r}^{in'} \frac{8.5}{15.5}.$$
 (8)

Для морской воды:

$$Q_{sw}^{out} + Q_{sw}^{outSGD} = (Q_{sw}^{in} + Q_{sw}^{inSGD}) \frac{11,5}{12.5}.$$
 (9)

 $Q_{\rm sw}^{\rm inSGD}$, $Q_{\rm sw}^{\rm outSGD}$ — объемная скорость подземного поступления морской воды в реку (in) и ее подземного возвращения в море (out).

В случае эстуария р. Раздольной предполагается, что гидравлический напор под действием приливов в водоносном слое возникает в период приливной фазы, в то время как в период отливной фазы он отсутствует в результате диссипации приливной энергии*, поэтому для периода зимней межени принимаем:

$$Q_{sw}^{\text{outSGD}} = 0. (10)$$

Тогда Q_{sw} рассчитывается по соотношению:

$$Q_{sw}^{inSGD} = \frac{12.5}{11.5} Q_{sw}^{out} - Q_{sw}^{in}.$$
 (11)

^{*} Гидродинамика береговой зоны и эстуариев: пер. с англ. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 394 с.

Разница в объеме вод при прямых и обратных течениях в придонном слое воды толщиной 1 м на величину $6.6 \cdot 10^3$ м³/сут соответствует расходу вытекающей солоноватой воды за сутки — $0.08 \text{ m}^3/\text{c}$, что и является «избыточным» расходом, вызванным потоком грунтовых вод со стороны моря через водоносный слой, под действием гидравлического напора, обусловленного приливами. Разница в объеме вод при прямых и обратных течениях в поверхностном слое воды толщиной 1 м на величину $230 \cdot 10^3$ м³/сут соответствует расходу вытекающей воды из эстуария в море за сутки — 2,66 м³/с. Заниженный расход речной воды $(2.66 \text{ m}^3/\text{c})$ в точке постановки автономной буйковой станции (AБC), рассчитанный по результатам прямых измерений течений по сравнению с расходом, предоставленным Примгидрометом по данным на посту в с. Тереховка, может объясняться двумя причинами. Во-первых, часть речного стока поступает в море через правую протоку, ответвление которой от основного русла происходит в районе ст. 8 (см. рис. 1). Во-вторых, часть речной воды, перемешиваясь с солоноватой придонной водой, формирует слой скачка с соленостью 3-22 %, занимающий в районе постановки АБС примерно 50 % всей водной толщи (слой 1,8-3,5 м), как видно на рис. 3. В период прямых течений происходит вынос этих вод из эстуария. По этой же причине рассчитанный расход SGD на основе данных о течениях в придонном слое также может быть занижен в 2 раза. Поэтому реальный поток при разгрузке осолоненных грунтовых вод в верхней части эстуария, вероятно, может составлять 0,16 м³/с.

Судя по расчетам и имеющимся гидрологическим данным, заполнение эстуария солоноватыми водами происходит не через лиман, а посредством грунтового водообмена. Именно этим может объясняться повышение солености и температуры в придонном слое при прямых течениях (в направлении моря) на суточной станции с зондированием SBE—19, которая была расположена ниже по течению реки от предполагаемого района выхода грунтовых вод.

Процесс выхода осолоненных грунтовых вод в эстуарии р. Раздольной, вероятно, может быть более масштабным, чем удалось зафиксировать с помощью результатов, полученных с использованием комплекса гидрологических наблюдений, которые представлены в данной статье. На возможность этой гипотезы указывает анализ воды в водоносных горизонтах скважин, пробуренных в долине р. Раздольной на расстоянии 40 км от устья реки [Челноков и др., 2008]. В этих гидрогеологических работах установлен слой на глубине осадков от 10 до 50 м, заполненный водами морского происхождения с минерализацией до 18 г/л. В ходе проведения зимних экспедиций ТОИ ДВО РАН в Амурском заливе и эстуарии р. Раздольной с 2005 по 2010 г. [Лазарюк и др., 2013; Тищенко, 2013; Буров и др., 2014] фиксировались повышенные значения температуры воды в придонном слое 1-3 м во внешней части эстуария (северная часть Амурского залива), что объяснялось потоком тепла от донных осадков. Мы полагаем, что эти аномалии также могут быть обусловлены грунтовым водообменном между сушей и Амурским заливом. Эта гипотеза основана на современных исследованиях, доказывающих, что поток веществ с грунтовыми водами в прибрежные лагуны, заливы, бухты и целые морские бассейны иногда сопоставим по объему потока вещества с речным стоком [Adyasari et al., 2018; Rodellas et al., 2018; Wang et al., 2018]. Иначе говоря, грунтовый водообмен между рекой и Амурским заливом создает аномалии не только в реке, но и в самом заливе. Наиболее интенсивный поток грунтовых вод из осадков согласно литературным данным характерен для зоны фронта между пресными и осолоненными грунтовыми водами [Xin et al., 2010; Robinson et al., 2016], что и объясняет относительно небольшую протяженность района с ярко выраженной повышенной температурой воды у дна в эстуарии р. Раздольной (рис. 4). Адвекция вод с повышенной температурой из района их непосредственного выхода из осадков сопровождается повышением температуры осолоненной воды во всей зоне смешения свыше 1 °C (рис. 4), несмотря на интенсивное зимнее выхолаживание и льдообразование.

Мы полагаем, что интенсивность разгрузки грунтовых вод в верхней части эстуария р. Раздольной определяется соотношением толщины ледяного покрова в районе устьевого бара реки, который определяет интенсивность водообмена в зоне смешения

и зависит от суровости зимы, и характеристикой приливов (вид волны и величина), которые создают гидравлический напор в водоносном горизонте [Полубаринова-Кочина, 1977; Фомин и др., 2017]. На это указывает то, что за период исследований с 2014 по 2018 г. в эстуарии р. Раздольной именно в наиболее суровую зиму 2018 г. удалось зафиксировать температуру, превышающую 2 °C в придонном осолоненном слое. Повторная съемка, проведенная спустя неделю, не показала ярко выраженной температурной аномалии у дна в этом же районе. Возможным объяснением этого может быть уменьшение периода действия гидравлического напора в водоносном горизонте в связи со сменой вида приливной волны с неправильной суточной на неправильную полусуточную и изменением фазы приливов в период выполнения съемки, т.е. 24.02.2018 г. зондирование было приурочено к наибольшей полной воде, а спустя неделю — к малой воде (http://esimo.oceanography.ru/tides/). Предметом будущих исследований процесса обмена грунтовыми водами в эстуариях будут установление закономерностей и районов выхода грунтовых вод с использованием длительных измерений с помощью донных автономных станций с мультипараметрическими зондами и изучение изотопного состава грунтовых и придонных осолоненных вод.

Выводы

Главную роль в формировании придонного слоя осолоненных вод в зоне смешения эстуария р. Раздольной в период ледостава играет поток грунтовых вод со стороны моря, вызванный гидравлическим напором в водоносном горизонте под действием приливов.

Область выхода грунтовых вод в зоне смешения в период ледостава проявляется в виде положительной температурной аномалии в придонном слое воды на протяжении 4 км вдоль профиля наибольших глубин эстуария на расстоянии 20 км от устьевого бара реки. Потоки тепла, связанные с выходом грунтовых вод, оказывают непосредственное влияние на толщину ледяного покрова — толщина льда в районе с температурной аномалией в два раза меньше по сравнению с толщиной ледяного покрова вдоль основной части зоны смешения.

Реверсивные течения приводят к адвекции вод с повышенной температурой из района их непосредственного выхода из осадков вниз по течению, что сопровождается повышением температуры в придонном слое осолоненной воды во всей зоне смешения и увеличением солености в период прямых течений в районе, расположенном ниже области выхода грунтовых вод.

Подземный водообмен в эстуарии р. Раздольной, по-видимому, оказывает влияние и на характеристики вод Амурского залива, а также является причиной формирования обнаруженного ранее придонного слоя повышенной температуры воды в зимний сезон в его северной части.

Благодарности

Авторы выражают благодарность А.Ф. Сергееву за ценные советы при проведении экспедиционных работ и при написании публикации. А.М. Колтунову, И.И. Горину, А.А. Воронину, В.А. Баннову — за помощь в подготовке и обслуживании измерительной техники, В.В. Калинчуку — за помощь в ходе ледовой экспедиции в 2018 г.

Финансирование

Работа выполнена в рамках НИР ТОИ ДВО РАН (тема № 6) при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-05-31127 мол_а) и Программы приоритетных исследований ДВО РАН «Дальний Восток» (грант 18-1-010).

Список литературы

Буров Б.А., Лазарюк А.Ю., Лобанов В.Б. Исследование теплового потока на границе вода–донные осадки в Амурском заливе Японского моря в зимний период // Океанол. — 2014. — Т. 54, № 6. — С. 744–753. DOI: 10.7868/S0030157414060021.

Важова А.С., Зуенко Ю.И. Особенности распределения биогенных элементов вдоль градиента солености в эстуариях рек Суходол и Раздольная (залив Петра Великого, Японское море) // Изв. ТИНРО. — 2015. — Т. 180. — С. 226–235.

Гидрология морских устьев рек Дальнего Востока: Тр. ДВНИГМИ / под ред. Л.П. Якунина. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989. — Вып. 38. — 182 с.

Горин С.Л. Эстуарии полуострова Камчатка: теоретические подходы к изучению и гидролого-морфологическая типизация. Итоги 10 лет исследований // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. — 2012. — Вып. 27. — С. 5–12.

Горин С.Л., Коваль М.В., Сазонов А.А., Терский П.Н. Современный гидрологический режим нижнего течения реки Пенжины и первые сведения о гидрологических процессах в ее эстуарии (по результатам экспедиции 2014 г.) // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. — 2015. — Вып. 37. — С. 33–52. DOI: 10.15853/2072-8212.2015.37.33-52.

Звалинский В.И., Марьяш А.А., Стоник И.В. и др. Продукционные и гидрохимические характеристики льда, подледной воды и донных осадков эстуария реки Раздольной (Амурский залив, Японское море) в период ледостава // Биол. моря. — 2010. — Т. 36, № 3. — С. 186-195.

Звалинский В.И., Марьяш А.А., Тищенко П.Я. и др. Продукционные характеристики эстуария реки Раздольной в период ледостава // Изв. ТИНРО. — 2016. — Т. 185. — С. 155—174.

Звалинский В.И., Недашковский А.П., Сагалаев С.Г. и др. Биогенные элементы и первичная продукция в эстуарии реки Раздольной (Амурский залив Японского моря) // Биол. моря. — 2005. — Т. 31, № 2. — С. 107–116.

Кафанов А.И., Лабай В.С., Печенева Н.В. Биота и сообщества макробентоса лагун северо-восточного Сахалина : моногр. — Южно-Сахалинск : СахНИРО, 2003. — 176 с.

Коваль М.В., Горин С.Л., Романенко Ф.А. и др. Условия среды и биологическое сообщество гиперприливного эстуария рек Пенжина и Таловка (северо-западная Камчатка) // Океанол. — 2017. — Т. 57, № 4. — С. 597–610. DOI: 10.7868/S0030157417040086.

Колпаков Н.В., Долганова Н.Т., Надточий В.А. и др. Экосистемные исследования биоресурсов прибрежных и эстуарных вод южного Приморья // ТИНРО—85. Итоги десятилетней деятельности. 2000–2010 гг. — Владивосток: ТИНРО-центр, 2010. — С. 103–128.

Кравцов В.Д. Некоторые особенности динамики приливных устьев рек северо-западного побережья Охотского моря // Тр. ГОИН. — 1980. — Вып. 159. — С. 71–84.

Лазарюк А.Ю., Лобанов В.Б., Пономарев В.И. Эволюция термохалинной структуры вод Амурского залива в холодный сезон // Вестн. ДВО РАН. — 2013. — № 6. — С. 59–70.

Михайлов В.Н. Гидрологические процессы в устьях рек : моногр. — М. : ГЕОС, 1997.-176 с.

Михайлов В.Н., Горин С.Л. Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей — эстуариев // Вод. ресурсы. — 2012. — T. 39, № 3. — C. 243–257.

Михайлов В.Н., Даценко Ю.С. Расчет сдвига фаз уровня и скорости течения в приливном устье реки // Тр. ГОИН. — 1973. — Вып. 116. — С. 113–124.

Михайлова М.В. Процессы проникновения морских вод в устья рек // Вод. ресурсы. — 2013. — Т. 40, № 5. — С. 439–455. DOI: 10.7868/S0321059613050052.

Подорванова Н.Ф., Ивашинникова Т.С., Петренко В.С., Хомичук Л.С. Основные черты гидрохимии залива Петра Великого : моногр. — Владивосток : ДВО АН СССР, 1989. — 201 с.

Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод : моногр. — М. : Наука, 1977. — 664 с.

Семкин П.Ю., Тищенко П.Я., Лобанов В.Б. и др. Динамика и структура вод в эстуарии реки Партизанской (залив Находка, Японское море) // Вод. ресурсы (в печати).

Семкин П.Ю., Тищенко П.Я., Михайлик Т.А. и др. Гидрохимические исследования эстуария реки Партизанской (залив Находка, Японское море) в период летней межени // Изв. ТИНРО. — 2018. — Т. 193. — С. 143–152. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-193-143-152.

Семкин П.Ю., Тищенко П.Я., Тищенко П.П. и др. Особенности гидрохимии эстуариев рек Артемовки и Шкотовки (Уссурийский залив, Японское море) летом 2011 г. // Изв. ТИНРО. — 2012. — Т. 171. — С. 267–284.

Симонов А.И. Гидрология и гидрохимия вод устьевого взморья в морях без приливов : моногр. — M. : Гидрометеоиздат, 1969. — 230 с.

Скриптунов Н.А. Влияние речного стока на гидрологические процессы на устьевом взморье в ледовый период // Тр. ГОИН. — 1976. — Вып. 129. — С. 5–36.

Тищенко П.П. Сезонная гипоксия Амурского залива : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — Владивосток : ТОИ ДВО РАН, 2013. — 16 с.

- **Тищенко П.Я., Вонг Ч.Ш., Волкова Т.И. и др.** Карбонатная система эстуария реки Раздольной (Амурский залив Японского моря) // Биол. моря. 2005. Т. 31, № 1. С. 51–60.
- **Тищенко П.Я., Семкин П.Ю., Павлова Г.Ю. и др.** Гидрохимия эстуария реки Туманной (Японское море) // Океанол. 2018. Т. 58, № 2. С. 192–204. DOI: 10.7868/S003015741802003X.
- **Тищенко П.Я., Семкин П.Ю., Тищенко П.П.** и др. Гипоксия придонных вод эстуария реки Раздольная // ДАН. 2017. Т. 476, № 5. С. 576–580. DOI: 10.7868/ S0869565217290217.
- Фомин Ю.В., Жмур В.В., Марченко А.В. Нестационарная фильтрация морских вод в водоносные слои прибрежной зоны моря // Вод. ресурсы. 2017. Т 44, № 1. С. 19–27. DOI: 10.7868/S032105961606002X.
- **Хлебович В.В.** Критическая соленость биологических процессов : моногр. Л. : Наука, 1974.-235 с.
- Челноков Г.А., Харитонова Н.А., Зыкин Н.Н., Верещагина О.Ф. Генезис подземных минеральных вод Раздольненского проявления (Приморский край) // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27, № 6. С. 65–72.
- **Шулькин В.М., Семыкина Г.И.** Поступление загрязняющих веществ в залив Петра Великого и оценка их вклада в создание экологических проблем // Современное экологическое состояние залива Петра Великого Японского моря. Владивосток : Издат. дом ДВФУ, 2012. С. 252–287.
- **Adyasari D., Oehler T., Afiati N., Moosdorf N.** Groundwater nutrient inputs into an urbanized tropical estuary system in Indonesia // Sci. Total Environ. 2018. Vol. 627. P. 1066–1079. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.281.
- **Burnett W.C., Cowart J.B., Deetae S.** Radium in the Suwannee River and estuary: spring and river input to the Gulf of Mexico // Biogeochemistry. 1990. Vol. 10, Iss. 3. P. 237–255.
- Costanza R., d'Arge R., de Groot R. et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital // Nature. 1997. Vol. 387. P. 253–260.
- **Davies J.L.** A morphogenetic approach to world shorelines // Zeitschrift für Geomorphologie. 1964. Vol. 8. P. 127–142.
- **Funahashi T., Kasai A., Ueno M., Yamashita Y.** Effects of Short Time Variation in the River Discharge on the Salt Wedge Intrusion in the Yura Estuary, a Micro Tidal Estuary, Japan // Journal of Water Resource and Protection. 2013. Vol. 5. P. 343–348. DOI: 10.4236/jwarp.2013.53A035.
- **Kasai A., Kurikawa Y., Ueno M. et al.** Salt-wedge intrusion of seawater and its implication for phytoplankton dynamics in the Yura Estuary, Japan // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2010. Vol. 86, № 3. P. 408–414.
- Lu C., Chen Y., Zhang C., Luo J. Steady-state freshwater–seawater mixing zone in stratified coastal aquifers // J. of Hydrology. 2013. Vol. 505. P. 24–34. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.09.017.
- **Robinson G., Ahmed A.A., Hamill G.A.** Experimental saltwater intrusion in coastal aquifers using automated image analysis: Applications to homogeneous aquifers // J. of Hydrology. 2016. Vol. 538. P. 304–313. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.04.017.
- **Rodellas V., Stieglitz T.C., Andrisoa A. et al.** Groundwater-driven nutrient inputs to coastal lagoons: The relevance of lagoon water recirculation as a conveyor of dissolved nutrients // Sci. Total Environ. 2018. Vol. 642. P. 764–780. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.095.
- **Santos I.R., Bryan K.R., Pilditch C.A., Tait D.R.** Influence of porewater exchange on nutrient dynamics in two New Zealand estuarine intertidal flats // Marine Chemistry. 2014. Vol. 167. P. 57–70. DOI: 10.1016/j.marchem.2014.04.006.
- Wang X., Baskaran M., Su K., Du J. The important role of submarine groundwater discharge (SGD) to derive nutrient fluxes into River dominated Ocean Margins The East China Sea // Marine Chemistry. 2018. Vol. 204. P. 121–132. DOI: 10.1016/j.marchem.2018.05.010.
- Wang X., Du J., Ji T. et al. An estimation of nutrient fluxes via submarine groundwater discharge into the Sanggou Bay A typical multi-species culture ecosystem in China // Marine Chemistry. 2014. Vol. 167. P. 113–122. DOI: 10.1016/j.marchem.2014.07.002.
- **Watanabe K., Kasai A., Antonio E.S. et al.** Influence of salt-wedge intrusion on ecological processes at lower trophic levels in the Yura Estuary, Japan // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2014. Vol. 139. P. 67–77. DOI: 10.1016/j.ecss.2013.12.018.
- Werner A.D., Bakker M., Post V.E.A. et al. Seawater intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges // Advances in Water Resources. 2013. Vol. 51. P. 3–26. DOI: 10.1016/j.advwatres.2012.03.004.
- **Xin P., Robinson C., Li L. et al.** Effects of wave forcing on a subterranean estuary // Water resources research. 2010. Vol. 46, W12505. DOI: 10.1029/2010WR009632.

References

- **Burov, B.A., Lazaryuk, A.Y., and Lobanov, V.B.,** Study of the heat flux at the water-bottom sediments in Amurskiy Bay in the Sea of Japan in the winter season, *Oceanology*, 2014, vol. 54, no. 6, pp. 695–704. doi 10.1134/S0001437014060022
- **Vazhova, A.S. and Zuenko, Yu.I.,** Patterns of nutrients distribution along salinity gradient in the estuaries of the rivers Sukhodol and Razdolnaya/Suifen (Peter the Great Bay, Japan Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno–Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2015, vol. 180, pp. 226–235.
- *Gidrologiya morskikh ust'ev rek Dal'nego Vostoka* (Hydrology of Marine River Estuaries in the Far East), Yakunin, L.P., Ed., Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989, vol. 38.
- Gorin, S.L., Kamchatka's estuaries: theoretical approaches and hydrological morphological typing. Ten-year research outcomes, *Issled. Vodn. Biol. Resur. Kamchatki Sev.-Zapadn. Chasti Tikhogo Okeana*, 2012, vol. 27, pp. 5–12.
- Gorin, S.L., Koval, M.V., Sazonov, A.A., and Terskiy, P.N., Modern hydrological regime of the Penzhina River downstream and first information about hydrological processes in the estuary (on results of expedition 2014), *Issled. Vodn. Biol. Resur. Kamchatki Sev.-Zapadn. Chasti Tikhogo Okeana*, 2015, vol. 37, pp. 33–52. doi 10.15853/2072-8212.2015.37.33-52
- Zvalinsky, V.I., Maryash, A.A., Stonik, I.V., Shvetsova, M.G., Sagalaev, S.G., Begun, A.A., and Tishchenko, P.Ya., Production and hydrochemical characteristics of ice, under-ice water and sediments in the Razdolnaya River estuary (Amursky Bay, Sea of Japan) during the ice cover period, *Russ. J. Mar. Biol.*, 2010, vol. 36, no. 3, pp. 186–195.
- Zvalinsky, V.I., Mar'yash, A.A., Tishchenko, P.Ya., Sagalaev, S.G., Tishchenko, P.P., Shvetsova, M.G., Chichkin, R.V., Mikhailik, T.A., and Koltunov, A.M., Production patterns in the estuary of the Razdolnaya River in period of freezing, *Izv. Tikhookean. Nauchno–Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2016, vol. 185, pp. 155–174.
- **Zvalinsky, V.I., Nedashkovsky, A.P., Sagalayev, S.G., Tishchenko, P.J., and Shvetsova, M.G.,** Nutrients and primary production in the Estuary of the Razdol'naya River (Amur Bay, Sea of Japan), *Russ. J. Mar. Biol.*, 2005, vol. 31, no. 2, pp. 91–101.
- Kafanov, A.I., Labai, V.S., and Pecheneva, N.V., *Biota i soobshchestva makrobentosa lagun severo-vostochnogo Sakhalina* (Biota and Macrobenthos Communities in Lagoons of Northeastern Sakhalin), Yuzhno-Sakhalinsk: SakhNIRO, 2003.
- Koval, M.V., Gorin, S.L., Romanenko, F.A., Lepskaya, E.V., Polyakova, A.A., Galyamov, R.A., and Esin, E.V., Environmental conditions and biological community of the Penzhina and Talovka hypertidal estuary (northwest Kamchatka) in the ice-free season, *Oceanology*, 2017, vol. 57, no. 4, pp. 539–551. doi 10.1134/S0001437017040129
- Kolpakov, N.V., Dolganova, N.T., Nadtochii, V.A., Nadtochii, V.V., Gusarova, I.S., Galysheva, Yu.A., Lukyanova, O.N., Milovankin, P.G., Bezrukov, R.G., and Bogacheva, S.V., Ecosystem studies of bioresources of coastal and estuarine waters in southern Primorsky Krai, in *TINRO*—85. *Itogi desyatiletnei deyatel'nosti.* 2000–2010 gg. (TINRO—85. Results of the One-Decade Activity. 2000–2010.), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2010, pp. 103–128.
- **Kravtsov**, **V.D.**, Some features of dynamics in tidal river estuaries of the northwestern coast of the Sea of Okhotsk, *Tr. Gos. Okeanogr. Inst.*, 1980, vol. 159, pp. 71–84.
- **Lazaryuk, A.Yu., Lobanov, V.B., and Ponomarev, V.I.,** Evolution of thermohaline structure in the Amurskiy Bay in a cold season, *Vestn. Dal'nevost. Otd. Ross. Akad. Nauk*, 2013, no. 6, pp. 59–70.
- **Mikhailov, V.N.,** *Gidrologicheskie protsessy v ust'yakh rek* (Hydrological Processes in River Estuaries), Moscow: GEOS, 1997.
- **Mikhailov, V.N. and Gorin, S.L.,** New definitions, regionalization, and typification of river mouth areas and estuaries as their parts, *Water Resour.*, 2012, vol. 39, no. 3, pp. 247–260.
- **Mikhailov, V.N. and Datsenko, Yu.S.,** Calculation of phase shift in the level and flow velocity in a tidal river estuary, *Tr. Gos. Okeanogr. Inst.*, 1973, vol. 116, pp. 113–124.
- **Mikhailova, M.V.,** Processes of seawater intrusion into river mouths, *Water Resour.*, 2013, vol. 40, no. 5, pp. 483–498. doi 10.1134/S0097807813050059
- Podorvanova, N.F., Ivashinnikova, T.S., Petrenko, V.S., and Khomichuk, L.S., *Osnovnye cherty gidrokhimii zaliva Petra Velikogo* (Main Features of Hydrochemistry of Peter the Great Bay), Vladivostok: Dal'nevost. Otd. Akad. Nauk SSSR, 1989.
- **Polubarinova-Kochina, P.Ya.,** *Teoriya dvizheniya gruntovykh vod* (The Theory of Groundwater Movement), Moscow: Nauka, 1977.
- Semkin, P.Yu., Tishchenko, P.Ya., Lobanov, V.B., Sergeev, A.F., Barabanshchikov, Yu.A., Mikhailik, T.A., Pavlova, G.Yu., Kostyleva, A.V., Shkirnikova, E.M., Tishchenko, P.P., and

Chizhova, T.L., Dynamics and structure of waters in the Partizanskaya River estuary (Nakhodka Bay, Sea of Japan), *Water Resour.*, 2019, vol. 46, no. 1, pp. 29–38.

Semkin, P.Yu., Tishchenko, P.Ya., Mikhailik, T.A., Barabanshchikov, Yu.A., Pavlova, G.Yu., Sagalaev, S.G., Tishchenko, P.P., Shvetsova, M.G., and Shkirnikova, E.M., Hydrochemical studies of the Partizanskaya River estuary (Nakhodka Bay, Japan Sea) in summer season of low water discharge, *Izv. Tikhookean. Nauchno–Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2018, vol. 193, pp. 143–152. doi 10.26428/1606-9919-2018-193-143-152

Semkin, P.Yu., Tishchenko, P.Ya., Tishchenko, P.P., Mikhailik, T.A., Shvetsova, M.G., Zvalinsky, V.I., Pavlova, G.Yu., Shkirnikova, E.M., Sagalaev, S.G., Khodorenko, N.D., Stepanova, V.I., Igumenova, O.V., and Barabanshchikov, Yu.A., Features of hydrochemistry in estuaries of the Artyomovka and Shkotovka Rivers (Ussuri Bay, Japan Sea) in summer of 2011, *Izv. Tikhookean. Nauchno–Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2012, vol. 171, pp. 267–284.

Simonov, A.I., *Gidrologiya i gidrokhimiya vod ust'evogo vzmor'ya v moryakh bez prilivov* (Hydrology and Hydrochemistry of Waters of the Estuarial Near-Shore Zone in Seas without Tides), Moscow: Gidrometeoizdat, 1969.

Skriptunov, **N.A.**, Influence of river discharge on hydrological processes in the estuarial near-shore zone in the ice period, *Tr. Gos. Okeanogr. Inst.*, 1976, vol. 129, pp. 5–36.

Tishchenko, P.P., Seasonal hypoxia of Amurskiy Bay, *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*, Vladivostok: TOI DVO RAN, 2013.

Tishchenko, P.Ya., Wong, C.S., Volkova, T.I., Gramm-Osipov, Johnson, V.K., L.M., Dudarev, O.V., Zvalinskii, V.I., Nedashkovskii, A.P., Pavlova, G.Yu., Chichkin, R.V., Sagalaev, S.G., Shevtsova, O.V., and Shkirnikova, E.M., Carbonate system of the Razdolnaya River estuary (Amur Bay, Sea of Japan), *Russ. J. Mar. Biol.*, 2005, vol. 31, no. 1, pp. 43–52.

Tishchenko, P.Ya., Semkin, P.Yu., Pavlova, G.Yu., Tishchenko, P.P., Lobanov, V.B., Marjash, A.A., Mikhailik, T.A., Sagalaev, S.G., Sergeev, A.F., Tibenko, E.Y., Khodorenko, N.D., Chichkin, R.V., Shvetsova, M.G., and Shkirnikova, E.M., Hydrochemistry of the Tumen River Estuary, Sea of Japan, *Oceanology*, 2018, vol. 58, n. 2, pp. 175–186. doi 10.1134/S0001437018010149

Tishchenko, P.Ya., Semkin, P.Ju., Tishchenko, P.P., Zvalinsky, V.I., Barabanshchikov, Yu.A., Mikhailik, T.A., Sagalaev, S.G., Shvetsova, M.G., Shkirnikova, E.M., and Shulkin, V.M., Hypoxia of bottom waters of the Razdolnaya River Estuary, *Dokl. Earth Sci.*, 2017, vol. 476, no. 2, pp. 1207–1211. doi 10.1134/S1028334X17100208

Fomin, Y.V., Zhmur, V.V., and Marchenko, A.V, Transient seawater inflow into seacoast aquifers, *Water Resour.*, 2017, vol. 44, no. 1, pp. 61–68.

Khlebovich, V.V., *Kriticheskaya solenost' biologicheskikh protsessov* (Critical Salinity of Biological Processes), Leningrad: Nauka, 1974.

Chelnokov, G.A., Kharitonova, N.A., Zykin, N.N., and Vereshchagina, O.F., Genesis of the mineral groundwaters of the Razdol'nenskii occurrence in Primorye, *Russ. J. Pac. Geol.*, 2008, vol. 2, no. 6, pp. 521–527.

Shulkin, V.M. and Semykina, G.I., Input of pollutants in Peter the Great Bay and assessment of their role in forming of ecological problems, in *Sovremennoe ekologicheskoe sostoyanie zaliva Petra Velikogo Yaponskogo morya* (The Current Ecological State of Peter the Great Bay, Sea of Japan), Vladivostok: Izd. Dom DVFU, 2012, pp. 252–287.

Adyasari, D., Oehler, T., Afiati, N., and Moosdorf, N., Groundwater nutrient inputs into an urbanized tropical estuary system in Indonesia, *Sci. Total Environ.*, 2018, vol. 627, pp. 1066–1079. doi 10.1016/j.scitotenv.2018.01.281

Burnett, W.C., Cowart, J.B., and Deetae, S., Radium in the Suwannee River and estuary: spring and river input to the Gulf of Mexico, *Biogeochemistry*, 1990, vol. 10, no. 3, pp. 237–255.

Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farberk, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Suttonkk, P., and van den Belt, M., The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, 1997, vol. 387, pp. 253–260.

Davies, J.L., A morphogenetic approach to world shorelines, *Z. Geomorphol.*, 1964, vol. 8, pp. 127–142. **Funahashi, T., Kasai, A., Ueno, M., and Yamashita, Y.,** Effects of short time variation in the river discharge on the salt wedge intrusion in the Yura Estuary, a micro tidal estuary, Japan, *J. Water Resour. Prot.*, 2013, vol. 5, pp. 343–348. doi 10.4236/jwarp.2013.53A035

Kasai, A., Kurikawa, Y., Ueno, M., Robert, D., and Yamashita, Y., Salt-wedge intrusion of seawater and its implication for phytoplankton dynamics in the Yura Estuary, Japan, *Estuarine, Coastal Shelf Sci.*, 2010, vol. 86, no. 3, pp. 408–414.

Lu, C., Chen, Y., Zhang, C., and Luo, J., Steady-state freshwater–seawater mixing zone in stratified coastal aquifers, *J. Hydrol.*, 2013, vol. 505, pp. 24–34. doi 10.1016/j.jhydrol.2013.09.017

- **Robinson, G., Ahmed, A.A., and Hamill, G.A.,** Experimental saltwater intrusion in coastal aquifers using automated image analysis: Applications to homogeneous aquifers, *J. Hydrol.*, 2016, vol. 538, pp. 304–313. doi 10.1016/j.jhydrol.2016.04.017
- Rodellas, V., Stieglitz, T.C., Andrisoa, A., Cook, P.G., Raimbault, P., Tamborski, J.J., van Beek, P., and Radakovitch, O., Groundwater-driven nutrient inputs to coastal lagoons: The relevance of lagoon water recirculation as a conveyor of dissolved nutrients, *Sci. Total Environ.*, 2018, vol. 642, pp. 764–780. doi 10.1016/j.scitotenv.2018.06.095
- Santos, I.R., Bryan, K.R., Pilditch, C.A., and Tait, D.R., Influence of porewater exchange on nutrient dynamics in two New Zealand estuarine intertidal flats, *Mar. Chem.*, 2014, vol. 167, pp. 57–70. doi 10.1016/j.marchem.2014.04.006
- Wang, X., Baskaran, M., Su, K., and Du, J., The important role of submarine groundwater discharge (SGD) to derive nutrient fluxes into river dominated ocean margins the East China Sea, *Mar. Chem.*, 2018, vol. 204, pp. 121–132. doi 10.1016/j.marchem.2018.05.010
- Wang, X., Du, J., Ji, T., Wen, T., Liu, S., and Zhang, J., An estimation of nutrient fluxes via submarine groundwater discharge into the Sanggou Bay A typical multi-species culture ecosystem in China, *Mar. Chem.*, 2014, vol. 167, pp. 113–122. doi 10.1016/j.marchem.2014.07.002
- Watanabe, K., Kasai, A., Antonio, E.S., Suzuki, K., Ueno, M., and Yamashita, Y., Influence of salt-wedge intrusion on ecological processes at lower trophic levels in the Yura Estuary, Japan, *Estuarine, Coastal Shelf Sci.*, 2014, vol. 139, pp. 67–77. doi 10.1016/j.ecss.2013.12.018
- Werner, A.D., Bakker, M., Post, V.E.A., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C., and Barry, D.A., Seawater intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges, *Adv. Water Resour.*, 2013, vol. 51, pp. 3–26. doi 10.1016/j.advwatres.2012.03.004
- Xin, P., Robinson, C., Li, L., Barry, D.A., and Bakhtyar, R., Effects of wave forcing on a subterranean estuary, *Water Resour. Res.*, 2010, vol. 46, no. W12505. doi 10.1029/2010WR009632
- *Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR. Ser. 3: Mnogoletnie dannye* (A Scientific and Applied Reference Guide to the Climate of the USSR, Ser. 3: Long-Term Data), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988, parts 1–6, no. 26 (Pimorsky Krai).
- *Mnogoletnie dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi. T. 1: RSFSR* (Long-Term Data on the Regime and Resources of Inland Surface Waters, vol. 1: RSFSR), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986, no. 21 (Basins of the Ussury and the Sea of Japan rivers).
- *Gidrodinamika beregovoi zony i estuariev* (Hydrodynamics of the Coastal Zone and Estuaries), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970. (Russian translation)

Поступила в редакцию 7.11.2018 г. После доработки 16.11.2018 г. Принята к публикации 15.01.2019 г.