

Гидрометеорология и экология. 2024. 74. С. 87—104.

Hydrometeorology and Ecology. 2024;(74):87—104.

Научная статья

УДК 556.545(282.247.29)«323»

doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-87-104

Изменения в структуре гидрологических характеристик устьевой зоны смешения реки Преголи (Юго-Восточная Балтика) в период осеннего осолонения

**Надежда Вадимовна Двоеглазова^{1,2},
Борис Валентинович Чубаренко¹**

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия,
nadya2eyes@mail.ru

² Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, Россия

Аннотация. С помощью натурных наблюдений (съёмки по длине русла и ежедневные вертикальные зондирования в одной точке) проведена оценка динамики и дальности проникновения вверх по руслу затоков солоноватых вод в устьевой участок реки Преголи в осенний период 2022 г. Максимальная дальность проникновения верхней границы устьевой зоны смешения в 2022 г. составила более 17 км, что превышает дальности, оценённые ранее по данным 90-х годов прошлого века. Выявленное усиление эффекта проникновения солоноватых вод вверх по руслу может усугубиться при существующей тенденции изменений местных климатических условий. Сохраняется угроза блокирования водозаборов г. Калининграда интрузиями вод с повышенной солёностью. Необходимо продление сети мониторинговых станций вверх по руслу реки.

Ключевые слова: интрузии солоноватых вод, гидрологические свойства, эстуарии, CTD-зондирование, река Преголя, Калининградский залив.

Благодарности. Сбор и интерпретация натурных данных выполнялись за счет госзадания ИО РАН (темы № FMWE-2021-0012 и № FMWE-2024-0025). Авторы выражают благодарность сотрудникам Калининградского управления Северо-Западного бассейнового филиала ФГУП «Росморпорт», оказавшим содействие при проведении экспедиционных работ, сотрудникам ГП КО «Водоканал» и Калининградского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, оказавшим поддержку на этапе сбора натурных данных, а также н.с. АО ИО РАН, канд. геогр. наук А. В. Килесо за помощь в проведении инструментальных измерений.

Для цитирования: Двоеглазова Н. В., Чубаренко Б. В. Изменения в структуре гидрологических характеристик устьевой зоны смешения реки Преголи (Юго-Восточная Балтика) в период осеннего осолонения // Гидрометеорология и экология. 2024. № 74. 87—104. doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-87-104.

Changes in the structure of the hydrological characteristics of the estuary mixing zone of the Pregolya River (South-East Baltic) during saline water inflow period in autumn

Nadezhda V. Dvoeglazova^{1, 2}, Boris V. Chubarenko¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia, nadya2eyes@mail.ru

² Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Summary. Using field observations (vertical CTD soundings of the water column), we assessed the dynamics and depth of penetration upstream of brackish water inflows into the estuary section of the Pregolya River in the autumn period of 2022. The initial data were obtained as a result of surveys along the river throughout the entire estuary mixing zone of the Pregolya River (October 11 and 27, November 14 and 29, 2022), and as a result of daily vertical profiling in the center of the Pregolya estuary zone during two months (from October 21 to December 2, 2022). Spatial measurements made it possible to obtain information about the structure of the estuarine mixing zone: (a) when the penetration of brackish water is traced in the entire water column from the surface to the bottom, and (b) when the interaction of brackish water with fresh water occurs only in the lower bottom layers. The maximum penetration range of the upper boundary of the estuarine mixing zone in 2022 was more than 17 km, which exceeds the ranges previously estimated based on the data of the 1990s. The revealed increase of the effect of brackish water penetration upstream can be explained by the existing trend of changes in local climatic conditions. It was possible to fix the protracted effect of the inflow of brackish waters, which creates a threat of blocking the water intakes of the Kaliningrad City by intrusions of brackish waters. With the existing trend in local climatic conditions changes, including an increase in the number of storms and a decrease in precipitation, brackish water inflows into the estuary section of the Pregolya River may cause interruptions in the water supply to the Kaliningrad City. To study the dynamics of the salinity wedge and its response to changes in hydrometeorological conditions, it is necessary to extend the network of monitoring stations upstream the river.

Keywords: brackish water intrusions, hydrological properties, estuary, CTD-probing, Pregolya River, Vistula Lagoon.

Acknowledgments. The collection and interpretation of field data were carried out at the expense of the state task of the IO RAS (the themes № FMWE-2021-0012 and № FMWE-2024-0025). The authors are grateful to the employees of the Kaliningrad Department of the «Rosmorport» North-Western Basin Branch for assistance during the field work and to employees of the municipal water supply enterprise «Vodokanal» and Kaliningrad Centre for Hydrometeorology and Environmental Monitoring for the support in data collection, and Alexander Kileso (PhD, researcher of AO IO RAS) for the help with instrumental measurements.

For citation: Dvoeglazova N.V., Chubarenko B. V. Changes in the structure of the hydrological characteristics of the estuary mixing zone of the Pregolya River (South-East Baltic) during saline water inflow period in autumn. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(74):87—104. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-87-104.

Введение

При описании эстуарных зон, располагающихся в пределах устьевых участков рек, т. е. зон смешения пресных речных вод с солоноватыми водами приёмного водоёма, выделяются фронтальный раздел, верхняя (речная) и нижняя (морская) граница эстуарной зоны [1]. Примеры [2, 3] изучения затоков солоноватых вод в реки из слабосолёных непривливаемых приёмных водоёмов, таких как Азовское, Белое, Балтийское моря (солёность в пределах 4,5 — 11 ‰), показывают, что

максимальные дальности проникновения составляют до 10 км (р. Кубань), 28 км (р. Западная Двина), 45 км (р. Лиелупе).

Для устьевых участков реки Преголи (рис. 1) характерны затоки солоноватых вод из Калининградского залива¹ [4]. Согласно проведённым ранее (до 2001 г. и в 2013 г.) исследованиям [5, 6], самые сильные затоки солоноватых вод в реку Преголю происходят в осенний сезон. По данным этих натурных наблюдений максимальная дальность проникновения солоноватых вод вверх по руслу Преголи составляла 17 км от устья (по положению изогалины 1 ‰ в придонном слое) [5]. Согласно модельным расчётам [6], солоноватые воды могут проникать вверх по руслу на расстояние до 20 км от устья, перемещаясь вверх по реке в условиях сильного нагонного ветра, подъёма уровня воды и уменьшения речного стока.

Кроме того, что солоноватые воды оказывают влияние на биологические сообщества [7], проникновение солоноватых вод на максимальные расстояния вглубь реки может нарушать функционирование системы водоснабжения г. Калининграда. В осенний период активных нагонов солоноватые воды проникают на 17 км от устья вплоть до водозабора Южной водопроводной станции (ЮВС-2), делая невозможным забор воды из реки [5]. От продолжительности таких периодов зависит, способны ли резервные водохранилища обеспечить водоснабжение без перебоев.

Исходная информация о гидрологии устьевых участков р. Преголи в осенний период была получена [5, 8] довольно давно. Её обобщение [9] не учитывало климатического тренда в характеристиках уровня воды (рост среднего уровня на 4,6 см за десятилетие в среднем за период с 1961 г. по 2018 г., с увеличением до 8,4 см за десятилетие в период с 1991 г. по 2005 г.), долговременные изменения ветрового воздействия и атмосферных осадков [10, 11, 12]. Для современной оценки интенсивности и дальности проникновения затоков солоноватых вод в р. Преголю необходимо получение новых данных и сравнение их с результатами более ранних измерений. К тому же, все ранее полученные данные для устьевой зоны смешения собирались методом выполнения пространственных разрезов с месячным шагом, совместный анализ данных о вертикальном распределении гидрологических характеристик по пространству и по времени не проводился.

Целью работы является оценка динамики гидрологических характеристик (солёность и температура с учётом временной изменчивости вертикальной и горизонтальной стратификации) на устьевом участке реки Преголи во время сезона активных нагонных явлений (осень) и сравнение результатов с предшествующими исследованиями.

Для достижения цели осенью 2022 г. были проведены детальные гидрологические съёмки по пространству и ежедневные зондирования в характерной точке

¹ Приёмным водоёмом для рукава Нижней Преголи является Калининградский-Вислинский залив, который по гидро-морфологической типизации является типичной эстуарной лагуной и в англоязычной литературе имеет название Vistula Lagoon [13]. Название «Калининградский-Вислинский залив» [14] используется для обозначения всей акватории, тогда как северная, принадлежащая России ее часть (56,2 % акватории), называется Калининградским заливом, южная (польская) часть — Вислинским заливом.

в зоне смешения вод реки Преголи с солоноватыми водами Калининградского залива, определены границы проникновения солоноватых вод и выполнен анализ гидрологической структуры вод с учётом гидрометеорологических факторов и в сравнении с ранее полученными результатами.

Объект исследования

Устьевая область р. Преголи относится к эстуарному типу с бесприливным устьем и полузакрытым устьевым взморьем [1, 15, 16]. Два устьевых рукава реки Преголи впадают в разные заливы — рукав Нижняя Преголя — в Калининградский залив, а рукав Дейма — в Куршский залив [4, 14]. Распределение стока по рукавам непостоянно. По данным различных публикаций, относящихся к разным периодам осреднения, среднегодовая пропорция изменяется в пределах 54—66 % для рукава Нижней Преголи и 34—46 % для рукава Деймы [14]. В данной статье, следуя реестру географических названий Калининградской области¹ и традиционным представлениям на картах, мы будем называть рукав Нижняя Преголя рекой Преголей, который и является её продолжением. Также в тексте будет учтено, что в части своего течения он разделяется на протоки Новая и Старая Преголя (рис. 1 б, в).

Устьевой створ для реки Преголи находится в точке её впадения в Калининградский залив (рис. 1 в, ст. 22). В работе он используется как начало отсчета дальности проникновения затока солоноватых вод вглубь реки. Устьевое взморье (преобладание морского гидрологического режима) — Калининградский залив и Калининградский морской канал — это вся акватория от устья Преголи до Балтийского пролива². Устьевой участок расположен выше по течению реки: от устья до места впадения реки Лавы [4].

Устьевая зона смешения, согласно [1], представляет собой участок реки, в котором происходит процесс трансформации речной воды в морскую (заливную). Границы устьевой зоны смешения р. Преголи перемещаются ниже или выше по течению реки Преголи и Калининградского морского канала в зависимости от сезона и гидрометеорологических характеристик [9]. Усиление повторяемости и скорости западных ветров, подъём уровня воды и уменьшение речного стока, действуя в совокупности, создают условия для движения солоноватых вод зоны смешения вверх по реке [5].

В устье р. Преголи находится административный центр — город Калининград, поэтому изучение изменчивости гидрологического режима имеет важное практическое значение. Проникновение солоноватых вод Калининградского залива вверх по реке Преголе создают проблемы для функционирования системы водоснабжения города Калининграда. Ранее водозабор городской системы водоснабжения

¹ <https://cgkipd.ru/upload/iblock/51f/1jdbcaudocdwmmi1mgqqypp7aaahhqyp.pdf>

² Протока между Калининградским заливом и Балтийским морем в районе г. Балтийска не имеет отдельного официального географического названия (отсутствует в реестре географических названий Калининградской области, URL: <https://cgkipd.ru/upload/iblock/51f/1jdbcaudocdwmmi1mgqqypp7aaahhqyp.pdf>). В научной литературе, начиная с классической публикации [17], она обозначается как Балтийский пролив (находится рядом с г. Балтийском).

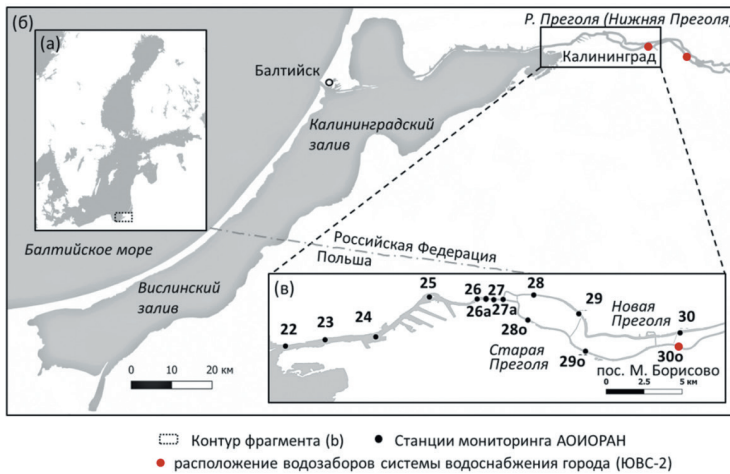


Рис. 1. Расположение объекта исследования в юго-восточной части Балтийского моря (а): приёмный водоём — Калининградский/Вислинский залив (б); схема станций мониторинга АОИОРАН в пределах устьевой зоны смешения от устья Преголи (ст. 22) до ЮВС-2 (ст. 30/30о) через протоки Новая Преголя и Старая Преголя (в).

Fig. 1 Location of the research object in the south-eastern part of the Baltic Sea (a), the Kaliningrad / Vistula Lagoon (b) is the terminal basinscheme of AO IO RAS monitoring stations within the estuarine mixing zone from the mouth of the Pregolya River (st. 22) to water supply facilities (station 30/30o) through the watercourses of New Pregolya and Old Pregolya (c).

располагался в пос. Малое Борисово (ГП КО «Водоканал»)¹ в 17 км от устья, а с 2008 г. он был перенесён выше по течению. Влияние нагонов солоноватой воды после этого уменьшилось, но связанные с этим перебои в водоснабжении полностью не прекратились.

Пригодной для забора считается вода с низкой хлорностью. Если зафиксировано превышение ПДК (350 мг/л, что почти равно 1 ‰ согласно пересчёту для распреснённых районов Каспийского моря [1]) (СанПиН 1.2.3685-21, 2021; ГОСТ 27065-86, 1988) исходной (забираемой) воды, водозабор из реки Преголи прекращается. Система водоснабжения переходит на потребление воды из двух водохранилищ общим объёмом порядка 3 млн м³ (ГП КО «Водоканал»). Этот резервный источник способен обеспечивать работу системы водоснабжения (60 % потребности города Калининграда) в течение 10—20 суток.

Материалы и методы исследования

При выборе периода для натурных наблюдений решающим фактором стало характерное для осеннего сезона влияние нагонных явлений, способствующее наиболее активному проникновению солоноватых вод вверх по реке [5].

¹ Государственное предприятие Калининградской области «Водоканал» (ГП КО «Водоканал») [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vk39.ru/o-vodokanale/vodosnabzhenie/> (Последнее обращение 24.12.2022).

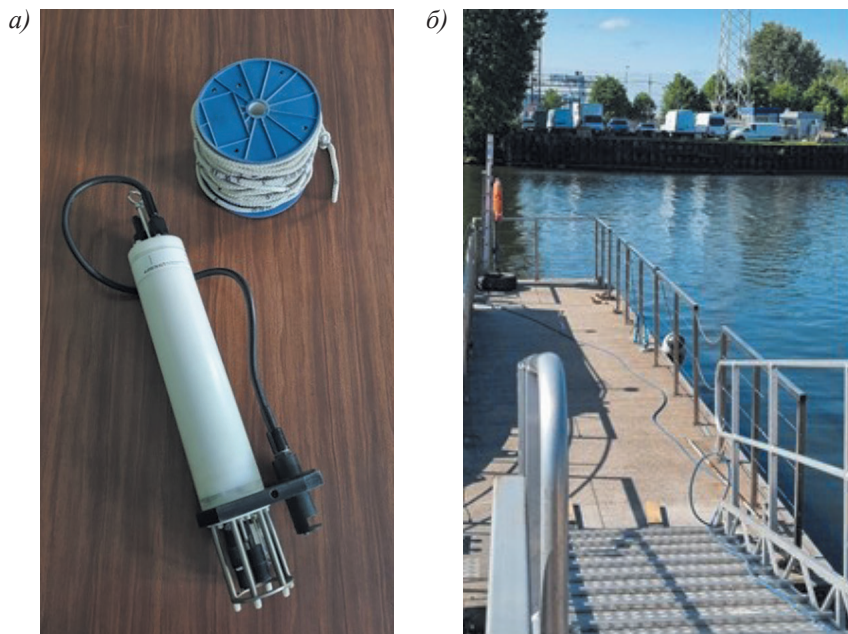


Рис. 2. Прибор Ocean Seven 316Plus Multiparameter Probe, которым выполнялись измерения (а); место проведения измерений (ст. 26а, причал ФГУП «Росморпорт») (б).

Fig. 2. The Ocean Seven 316Plus Multiparameter Probe (a) used to measure; (b) place of measurements (st. 26a, mooring of FSUE «Rosmorport»).

В период с 11 октября по 2 декабря 2022 г. инструментальные наблюдения (вертикальные зондирования гидрологическим зондом Ocean Seven 316Plus Multiparameter Probe, рис. 2 а) проводились в устьевой области р. Преголи в рамках двух подходов. Первый — зондирования по сети мониторинговых станций АО ИО РАН (рис. 1) с периодичностью один раз в две недели (4 обследования: 11 и 27 октября, 14 и 29 ноября 2022 г.). Протяженность участка проведения работ — 52 км (от молов в г. Балтийске до водозабора ЮВС-2 в г. Калининграде, количество станций — 27 шт.). Работы выполнялись с борта маломерного плавсредства после полной остановки.

Второй подход — ежедневные зондирования в одной контрольной точке (рис. 1 в, ст. 26а), расположенной в центральной части устьевой зоны смешения (причал ФГУП «Росморпорт» в 8 км от устья, выступающий в сторону фарватера до глубины 7 м, рис. 2 б). Период работ — с 21 октября по 2 декабря 2022 г. в интервале с 8:00 до 10:00 местного времени.

Гидрологические измерения были дополнены данными по изменению уровня воды в г. Калининграде (гидропост Калининград–Рыбный порт) и о ходе ветра и осадков в г. Балтийске в период с 1 октября по 23 декабря 2022 г.

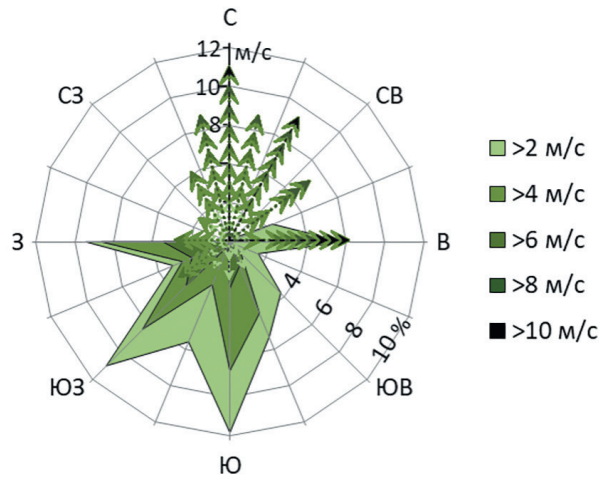


Рис. 3. Преобладающие направления ветра (по данным метеостанции Балтийск, суточное осреднение) за период с 21 октября по 2 декабря 2022 г. Информация представлена в комбинированном виде — роза ветров по градациям скорости и векторы ветра, иллюстрирующие величину и направление скорости ветра.

Fig. 3. The prevailing wind directions (according to the Baltiysk meteorological station, daily average) for the period from October 21 to December 2, 2022. The information is presented in a combined form — a wind rose showing the direction which the wind blew ‘from’ and speed gradations, and vectors, illustrating the magnitude and direction of wind speed.

В период измерений господствовали ветра юго-западных румбов (рис. 3) с максимальными скоростями до 11—15 м/с. Во время первых трёх обследований (11 и 27 октября, 14 ноября 2022 г.) преобладали юго-западные ветра (рис. 4 а), за период было отмечено 6 случаев повышения скорости ветра (порывы до 10—16 м/с). После 16 ноября 2022 г. господствующее направление ветра изменилось, преобладали южные — юго-восточные ветра, имелся эпизод повышения скорости ветра с порывами выше 9 м/с, но непосредственно перед последним обследованием (29 ноября 2022 г.) ветер был слабый (средняя скорость падала до величин менее 1 м/с, а порывы — менее 4 м/с).

Водный режим во время проведения измерений можно разделить на три периода. Первые три обследования пришлось на период с 1 октября по 15 ноября 2022 г.), когда среднесуточный уровень воды изменялся, повторяя проявления ветровой активности, в пределах 34 см (рис. 4 б) с аномалиями от –17 до 17 см относительно среднего значения за период. Четвёртое обследование пришлось на окончание второго периода с 16 ноября по 6 декабря 2022 г., характеризующегося монотонным падением уровня на 30 см. Самые сильные скачки уровня пришлось на период с 7 декабря по 22 декабря 2022 г. и были вызваны сильной штормовой активностью (до 15 м/с).

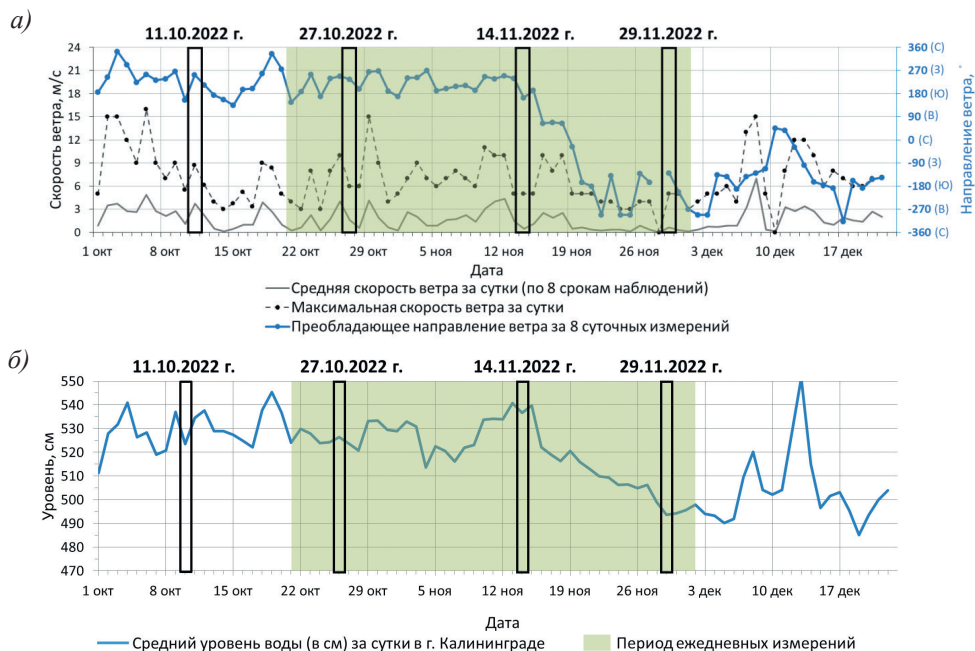


Рис. 4 Характеристики ветра в г. Калининграде по данным [18] за период с 1 октября по 22 декабря 2022 г. (а) и уровень воды (условная шкала) по данным гидропоста Калининград – Рыбный порт (Росгидромет) за период с 1 октября по 22 декабря 2022 г. (б).

Fig. 4. Wind characteristics in Kaliningrad according [18] to for the period from October 1 to December 22, 2022 (a) and water level (conditional scale) according to the Kaliningrad Sea Fishing Port gauging station (ROSHYDROMET) for the period from October 1 to December 22, 2022 (b).

Структура зоны смешения

В пределах устьевой зоны смешения р. Преголи (рис. 5), выделяются (по [1]) три подзоны (перечислены в направлении от приёмного водоёма вверх по руслу) со следующими характеристиками:

— в подзоне опреснения пограничные значения солёности должны достигать 90 % средней солёности приёмного водоёма, что по условиям для Калининградского залива [13] даёт граничную солёность 3,6 ‰;

— во фронтальной подзоне горизонтальные и вертикальные градиенты достигают максимальных значений на фронтальном разделе, положение которого меняется во времени;

— пресноводная подзона с солёностью менее 1 ‰ (для реки Преголи, как правило, это фоновая солёность со значениями 0,26 — 0,3 ‰).

Привязка расположения подзон к отдельным участкам акватории (рис. 5) выполнена по результатам анализа данных мониторинга за несколько лет (для осени) [9].

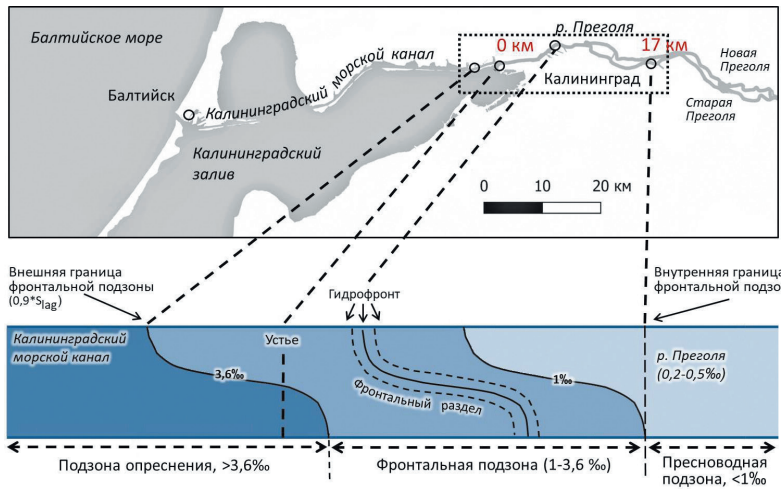


Рис. 5. Схема зонирования (согласно [1]) устьевой зоны смешения в р. Преголе: в порядке от приёмного водоёма вверх по руслу — подзона опреснения (тёмно-синий), фронтальная подзона (синий), пресноводная подзона (голубой). Среднемноголетняя ситуация [9] для осеннего периода.

Fig. 5. Zoning scheme (according to [1]) of estuary mixing zone in the Pregolya River: in sequence from the terminal basin upstream — desalination subzone (dark blue), frontal subzone (blue), freshwater subzone (light blue). The long-term average situation [9] for the autumn period.

Зона смешения (1—4 ‰) сезонно мигрирует на 10—20 км как вверх, так и вниз по течению, а также укорачивается или удлиняется. Зимой и очень ранней весной зона смешения сокращается до 3—5 км в длину и локализуется в районе гаваней порта Калининград (7—10 км выше устья). В это время характерные значения вертикального и горизонтального градиентов солёности составляют 0,3—0,35 ‰ на м и км соответственно. Весеннее усиление речного стока Преголи растягивает зону смешения на длину до 10—25 км вдоль канала и отодвигает её центр в сторону Балтийска так, что он располагается на 10—20 км от устья в сторону моря, а горизонтальный и вертикальный градиенты солёности спадают до 0,05—0,15 ‰ на м и км соответственно. В начале лета речной сток значительно уменьшается, и любое повышение уровня воды на границе море-залив немедленно индуцирует очередную подвижку придонной интрузии морской воды вдоль Калининградского морского канала в сторону устья Преголи. В результате вода солёностью 4,5—5 ‰ достигает устья реки Преголи к осени, но верхний слой воды остается преимущественно пресным. Вертикальные градиенты достигают максимума (до 0,5 ‰ на м).

В интересующий нас осенний период внешняя (морская) граница устьевой зоны смешения обычно находится в Калининградском морском канале, а внутренняя (речная) — выше по течению в реке Преголе вплоть до 17 км выше устья (рис. 5); положение обеих границ непостоянно (вариации в пределах 2—5 км), а зависит от предыстории гидрометеорологических характеристик [9, 13].

Форма фронтального раздела меняется в зависимости от активности перемешивания [19]. Он может представлять собой полосу сгущения изогалин вертикальной ориентации, справа и слева от которой солёность однородна от поверхности до дна; либо форму ярко выраженного солёностного клина с максимумом вертикального градиента солёности в промежуточных слоях (рис. 6 б, г) и слоем опресненных вод у поверхности (что соответствует солёностной придонной интрузии, когда реализуется фактически 2-слойный режим); либо смешанные варианты, как, например, на рис. 6 а и на рис. 6 в, когда в верхних слоях реализуется хорошее вертикальное перемешивание, изогалины почти вертикальны, а в придонных слоях имеется солёностная интрузия.

Пространственная (вертикальная и горизонтальная) изменчивость гидрологических характеристик

По результатам натурных наблюдений в осенний период 2022 г. (рис. 6) удалось зафиксировать глубокое вторжение зоны смешения в устьевой участок реки Преголи, а также выявить структуру этой зоны, иллюстрирующую различную степень смешения речных вод с солоноватыми водами залива.

Самое глубокое вторжение было зафиксировано 29 ноября, верхняя граница зоны смешения находилась гораздо выше последней станции (ст. 30о, находящейся в 17 км от устья), так как значения солёности в придонном слое на этой станции достигли 4,1 ‰, а нижняя граница была локализована существенно выше устья.

По вертикальным разрезам (рис. 6) видно, что изогалиния 3,6 ‰ выклинивается на поверхность в районе станций 22—24. Согласно параметру стратификации n^1 [3, 19, 20], рассчитанному по данным на станциях 25—30о, получено, что 11 октября (рис. 6 а, $n = 0,4—0,7$) и 14 ноября (рис. 6 в, $n = 0,4—1,2$) распределение солёности на станциях 25—30о соответствует второму типу проникновения [3] или смешения [20] солоноватых вод, который характеризуется частичным (умеренным) вертикальным перемешиванием и умеренным характером стратификации [3, 20]. Для дат 27 октября (рис. 6 б, $n = 1,2—1,6$) и 29 ноября (рис. 6 г, $n = 1,2—2$) параметр стратификации соответствует третьему типу проникновения солоноватых вод, который характеризуется слабым вертикальным перемешиванием и сильной стратификацией с наличием клина солоноватых вод.

Вертикальные градиенты солёности 27 октября и 29 ноября 2022 г. заметно более резкие, а 11 октября и 14 ноября 2022 г. — размытые. Наибольшие вертикальные градиенты, измеренные 27 октября и 29 ноября, были локализованы на глубинах 4 и 3,4 м и были равны 21,5 и 17,4 ‰/м соответственно. Величины градиентов 11 октября и 14 ноября были несколько меньше, они были локализованы на глубинах 3,2 и 3 м составили 1,2 и 8,9 ‰/м соответственно.

Горизонтальный градиент изменения придонной солёности от ст. 25 до ст. 30о был больше, чем подповерхностной и составил 0,3 ‰/км 11 октября и 27 октября,

¹ Применение параметра стратификации в случае, когда в верхних слоях находится пресная вода, приводит к нефизичному результату, когда от солёности придонного горизонта ничего не зависит, и при любой, даже самой маленькой солёности у дна, параметр стратификации равен 2.

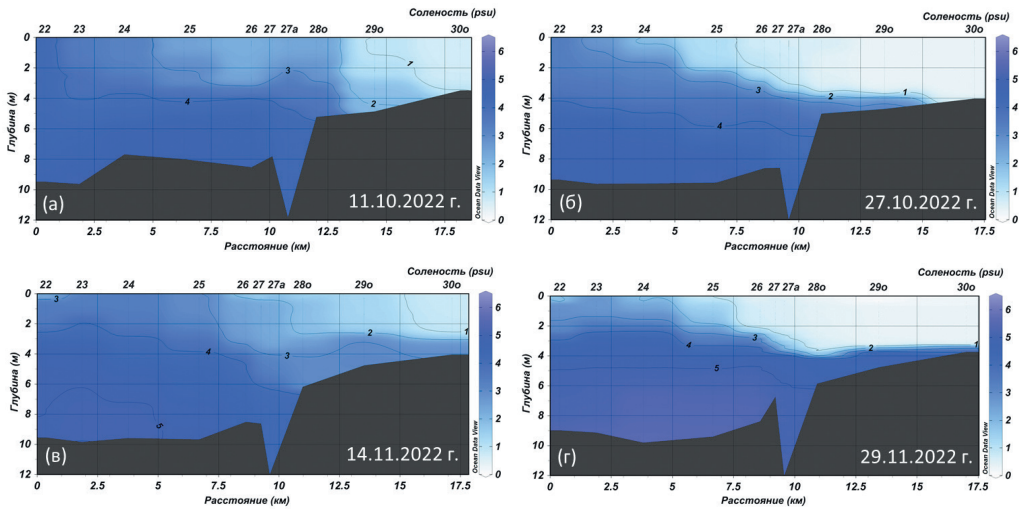


Рис. 6. Вертикальные разрезы в поле солёности для устьевой зоны смешения от устья рукава Нижней Преголи (ст. 22) до станции 30о (по протоке Старой Преголи) 11 октября (а), 27 октября (б), 14 ноября (в) и 29 ноября (г) 2022 г.

Fig. 6. Vertical sections in the salinity field for the estuary mixing zone from the mouth of the Downstream Pregolya branch (station 22) to the station 30o (along the Old Pregolya watercourse) on October 11 (a), October 27 (b), November 14 (c) and November 29 (d) 2022.

а 14 ноября и 29 ноября несколько меньше, 0,2 и 0,1 ‰/км соответственно. Горизонтальный градиент изменения солёности в подповерхностном слое составил 0,2 ‰/км 11 октября и 14 ноября, 0,1 ‰/км — 27 октября и 29 ноября.

Временная изменчивость вертикальной структуры гидрологических характеристик в районе расположения фронтального раздела

В придонных слоях контрольной точки ежедневного мониторинга (рис. 1, ст. 26а) в течение всего периода проведения измерений присутствовала вода (рис. 7 а) с солёностью > 1 ‰ (максимальные значения достигали 5,5 ‰). Следовательно, вертикальная структура всегда была неоднородна и присутствовала вертикальная стратификация водной толщи по солёности и плотности.

В течение периода с 21 октября по 20 ноября 2022 г. наблюдалась частая смена режима осолонения исследуемого участка. Наблюдалось и почти полное опреснение (солёность < 1 ‰) верхних слоёв до глубин 2—3,5 м, и обратная ситуация — осолонение почти всей водной толщи (солёность достигала 3 ‰ в поверхностном слое). После 20 ноября 2022 г. почти неизменно сохранялась двухслойная структура: фактически пресная вода (< 1 ‰) в слоях до 2 м и солоноватые воды (солёность 4—5,5 ‰) в придонных слоях (глубже 3 м) с зоной повышенных вертикальных градиентов солёности (5 ‰/м) между ними.

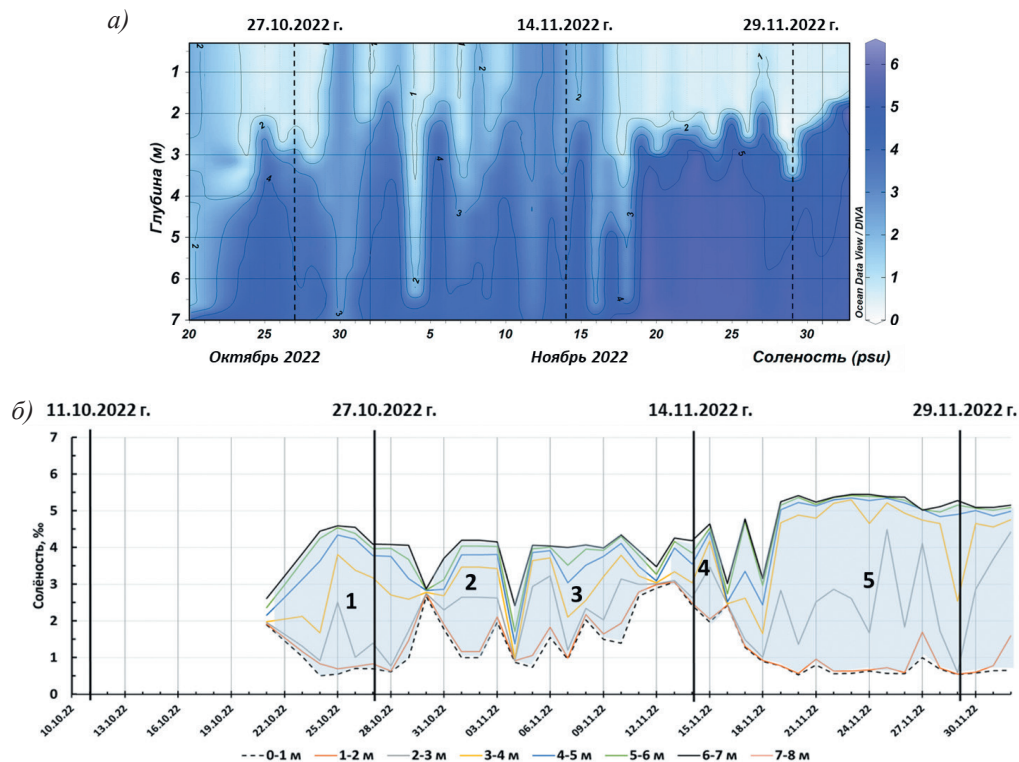


Рис. 7. Временная изменчивость структуры солёности (а) и средней солёности на обособленных горизонтах (б) на ст. 26а в период с 21 октября по 2 декабря 2022 г. (периоды сильной стратификации обозначены цифрами 1—5).

Fig. 7. Temporal variability of the structure of salinity (a) and average salinity at isolated horizons (b) in point 26a in the period from October 21 to December 2, 2022 (periods of strong stratification are indicated by numbers 1—5).

Смена режимов осолонения хорошо иллюстрируется диаграммой на рис. 7 б, на которой представлен временной ход значений солёности для слоёв 1 м толщиной. Закрашенная область соответствует условиям стратификации: чем она шире, тем больше разница по солёности между верхним и придонным слоями. Периоды сильной стратификации разделяются краткосрочными моментами возникновения хорошего вертикального перемешивания, которые отражаются на диаграмме в виде сужений закрашенной области.

Из диаграммы видно, что выделяются пять периодов (см. рис. 7 б) с сильно стратифицированной по солёности водной толщей: 21—30 октября, 30 октября—3 ноября, 4—12 ноября, 13—16 ноября и 16 ноября—2 декабря 2022 г. Для них характерно резкое повышение солёности на глубинах 4—5 м, соответствующих ядру солёностного клина.

Обсуждение результатов

По данным пространственных измерений удалось выявить наличие двух характерных структур (рис. 8) распределения солёности: первая — с размытой, и вторая — с чёткой фронтальной границей между солоноватыми и пресными речными водами.

Ситуация с более слабой вертикальной стратификацией водной толщи, а значит, и с более размытой границей между пресными и солоноватыми водами, наблюдалась 11 октября и 14 ноября 2022 г. (рис. 8 а). Измерениям в эти дни предшествовал ветер западных и юго-западных румбов. Ветер западных румбов (порывы до 9 м/с) 11 октября 2022 г. вовлек водную толщу в процесс перемешивания, уменьшив вертикальные градиенты. Для 14 ноября 2022 г. условия были схожи (ветер был на 2 дня раньше, а в день проведения измерений наблюдался слабый ветер юго-восточных румбов).

Ситуация, зафиксированная 27 октября и 29 ноября 2022 г. (рис. 8 б), иллюстрирует случай пологого солёностного клина (с резко очерченной фронтальной границей между солоноватыми и пресными водами), обеспечивающего проникновение солоноватых вод глубоко вверх по реке. Установившийся и продолжающийся в течение недели (с 20 по 29 ноября 2022 г.) восточный—юго-восточный ветер (рис. 5 б), усилив сток реки, спровоцировал придонный «интрузионный противозаток», движущийся вверх по течению реки (влияние эжекторного эффекта на нижние слои воды) [5]. На уровне же верхних трех метров солёность (0,3 ‰) на момент измерений соответствовала значениям пресной речной воды. Воздействия ветра со скоростью менее 3 м/с (20—29 ноября 2022 г.) не хватило для перемешивания всей толщи и вовлечения придонного слоя. Кроме того, ослабление действия ветра (в течение 10 дней с 19 ноября после продолжительных нагонов) обеспечило активизацию стока реки и оттеснение границы фронтальной подзоны вниз по реке в верхних слоях.

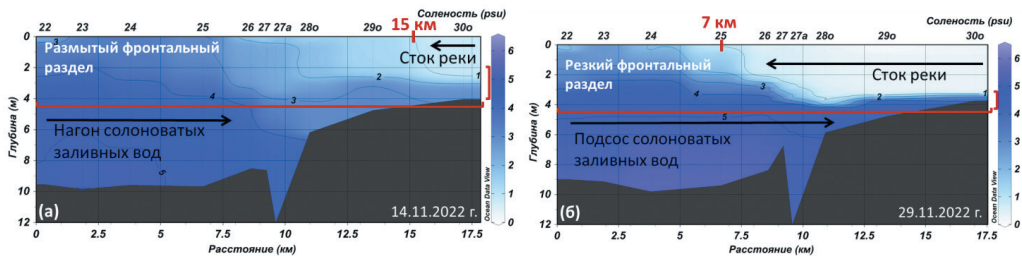


Рис. 8. Схемы двух структур на примере вертикальных разрезов в поле солёности для устьевой зоны смешения от устья рукава Нижней Преголи (ст. 22) до ст. 300 (по протоке Старой Преголи) 14 ноября (а) и 29 ноября (б) 2022 г.

Fig. 8. Schemes of two structures in the salinity field for the estuary mixing zone from the mouth of the Downstream Pregolya branch (st. 22) to the station 300 (along the Old Pregolya branch) on November 14 (a) and November 29 (b), 2022.

Продолжительность периода затoka, размер и структура которого зафиксированы пространственными измерениями 29 ноября 2022 г., составила 15 дней с 18 ноября по 02 декабря 2022 г. В этот период на станции 26а значения солоноватой воды наблюдались в среднем глубже двух метров (рис. 7 а), что не влияет на забор питьевой воды.

Предположительно такая структура сохранялась ещё в течение 5—10 дней до 7—12 декабря 2022 г., после чего из-за усиления западных ветров и подъёма уровня воды (рис. 4 а, б) стратификация должна была приобрести менее выраженный характер. Это привело бы к однородной вертикальной структуре водной толщи по солёности и повышению солёности поверхностных слоёв до среднего значения на станции — 0,66 ‰, что близко к ПДК (СанПиН 1.2.3686-21, 2021; ГОСТ 27065-86, 1988), следовательно, водозабор из реки осуществлять нельзя. Факт перекрытия водозабора 12.12.2022 г. (ГП КО «Водоканал») подтверждает это предположение, а информация о длительности перекрытия даёт оценку продолжительности затoka — 9 суток.

Временная изменчивость вертикального распределения солёности (рис. 7 а) и средней солёности для однометровых слоёв (рис. 7 б) в середине устьевой зоны смешения реки Преголи говорит о частой кратковременной смене режима осолонения исследуемого участка с чередованием однородного и стратифицированного распределения солёности по вертикали.

Все обследования по системе станций мониторинга относятся к периодам стратифицированной вертикальной структуры солёности продолжительностью от 4 до 16 дней (отмечены цифрами 1—5 на рис. 7 б). На даты 27 октября и 29 ноября пришлось более сильная стратификация, так как разница значений солёности между придонным и поверхностным горизонтами (периоды 1 и 5 на рис. 7 б) составляла порядка 3,5—4,5 ‰, а на 14 ноября — более слабая (период 4 на рис. 7 б), размах составил около 2 ‰. Разница между более сильной и более слабой стратификацией в 2,5 ‰ прослеживается и на структуре вертикальных разрезов в поле солёности (рис. 8 а, б).

Периоды однородной вертикальной структуры соотносятся с действием ветров вдольрусловых направлений с порывами 9—15 м/с: 30 октября, 4 ноября и 12 ноября — западных, а 16 ноября и 18 ноября — восточных. Но структура восстанавливается после перемешивания уже на следующие сутки, и пространственное распределение принимает прежнюю структуру солёностного клина.

Совместный анализ пространственно-временной изменчивости показал, что в целом характер гидрологической структуры всей устьевой зоны смешения хорошо прослеживается в данных, полученных на одной контрольной точке.

По данным пространственных измерений по сети станций мониторинга АО ИО РАН [5, 9], известно, что в осенний сезон максимальные значения в устье реки (ст. 22) достигали 4,5—5 ‰, что несколько меньше в сравнении с 5,4 ‰ осенью 2022 г. Ранее также было известно, что солоноватые воды могли доходить до станций 25, 26 и даже до станции 30а в районе ЮВС-2, в то время как сейчас регистрируется наличие более сильного и продолжительного затoka. Выделение периодов осолонения устьевой зоны по временному ряду ранее проводилось [5], но без параллельного сравнения с пространственными измерениями.

Бóльшие значения солёности (5,4 ‰) выше устья (ст. 22—27) регистрировались в единоразовом обследовании в ноябре 2015 г. [21], но без охвата всей устьевой зоны смешения (станций выше по реке). В 2019 г. значения 5,6 ‰ [7] для участка от устья до слияния рукавов Старой и Новой Преголи (ст. 22—30о) были получены по данным лишь весенне-летнего сезона (июнь). Эти сведения в совокупности с результатами данной работы свидетельствуют о более глубоком проникновении затока солоноватых вод вверх по руслу в настоящее время по сравнению с условиями на рубеже 2000 годов [5]. Это может быть проявлением влияния изменения местных климатических условий (ослабление стока реки в связи с уменьшением количества осадков). Из этого факта также следует техническая рекомендация о необходимости расширения сети станций вверх по реке.

Заключение

Благодаря сравнению результатов по двум видам данных (вертикальные зондирования на разрезах вдоль длины русла и ежедневные — в одной точке) была получена более подробная, чем было известно ранее [5, 6, 8, 13, 21], характеристика гидрологической структуры устьевой зоны смешения и описана её мелко-масштабная изменчивость.

Результаты проведенных в 2022 году исследований показали, что верхняя граница зоны смешения заливной и речной вод осенью находится дальше вглубь речного русла, чем было оценено ранее по данным 90 годов XX века [5]. С учётом имеющихся изменений регионального климата [10, 11] это позволяет выдвинуть гипотезу, что в настоящее время солёностный клин в осенний сезон проникает существенно глубже в устьевой участок, что может быть результатом более часто повторяющегося подпора речных вод вследствие воздействия западных ветров и снижения количества атмосферных осадков.

Для фиксации максимального продвижения солёностного клина необходимо расширить сетку мониторинговых станций, продлив её выше по течению реки вплоть до точки разделения реки на два протока — Новую и Старую Преголю.

По данным измерений 2022 г., выделены две структуры, характерные для смешения речных вод с солоноватыми водами залива. Первая, когда проникновение солоноватых вод затрагивает верхние горизонты, воздействуя и на водозабор, вторая, когда интрузия солоноватых вод может проникать гораздо дальше вверх по течению, не взаимодействуя с верхними слоями и не перекрывая устройства для водозабора.

Полученные в ходе работ данные подтверждают присутствие эффекта проникновения солоноватых вод и, возможно, указывают на тенденцию к его усилению. Значит угроза блокирования водозаборов г. Калининграда на реке Преголе интрузиями вод с повышенной солёностью сохраняется и требует построения детальной модели процесса в условиях увеличения воздействия западных ветров [10], так как срок действия затока может превышать срок, на который рассчитан расход воды из резервных источников водоснабжения.

Список литературы

1. Михайлов В. Н., Михайлова М. В., Магрицкий Д. В. Основы гидрологии устьев рек // Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет. М.: ООО «Издательство ТРИУМФ». 2018. С. 314. ISBN 978-5-89392-818-1. EDN LWFRFT.
2. Повалишников Е.Д. Причины проникновения морских вод в реки и его экологические последствия // Вестник Московского университета. 2001. 5 (3). С. 20—28. EDN: XSSXGL.
3. Михайлова М. В. Процессы проникновения морских вод в устья рек // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 5. С. 483—498. doi: 10.7868/S0321059613050052. EDN QYXJGV.
4. Маркова Л. Л., Нечай И. Я. Гидрологический очерк устьевых областей рек Немана и Преголи. // Труды ГОИН. Вып.49. М.: 1960. С.118—157.
5. Чубаренко Б. В., Шкуренок В.И. Физические механизмы проникновения солёных вод вверх по реке Преголе с учётом влияния рельефа дна // Физические проблемы экологии (экологическая физика). 2001. № 7. С. 80—88.
6. Домнин Д. А., Соколов А. Н. Особенности и закономерности затока солоноватых масс в лагунно-эстуарной системе Калининградский залив – Преголя – Куршский залив посредством данных контактных измерений и моделирования // Известия КГТУ. 2014. №35. С.11—20.
7. Полунина Ю. Ю., Стонт Ж. И. Влияние ветровых условий на распределение зоопланктона устье-вой области реки Преголи (бассейн Балтийского моря) после техногенной трансформации её русла // Морской биологический журнал (Marine Biological Journal). 2022. Т. 7. №1. С. 78—92. doi: 10.21072/mbj.2022.07.1.07. EDN WLTBGF.
8. Домнин Д. А., Пилипчук В. А., Карманов К. В. Формирование затока солоноватых вод в лагунно-эстуарной системе водосборного бассейна Вислинского залива и реки Преголи в результате сгонно-нагонных явлений // Естественные и технические науки. 2013. № 6. С. 206—211. EDN: RRRENN.
9. Chubarenko B., Domnin D., Navrotskaya S. et al. Transboundary Lagoons of the Baltic Sea (Chapter 6). [In:] R. Kosyan (ed.) The Diversity of Russian Estuaries and Lagoons Exposed to Human Influence, Estuaries of the World // Switzerland: Springer. 2017. P. 149—191. doi: 10.1007/978-3-319-43392-9_6.
10. Стонт Ж. И., Навроцкая С. Е., Чубаренко Б. В. Многолетние тенденции изменчивости гидрометеорологических характеристик в Калининградском регионе // Океанологические исследования. 2020. Т. 48, № 1. С. 45—61. doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(1).3.
11. Павловский А. А., Шамшури В. И. Влияние повышения уровня Балтийского моря на историко-культурное наследие России // Гидрометеорология и экология. 2021. № 65. С. 681—693. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-681-693.
12. Малинин В. Н., Гордеева С. М., Митина Ю. В., Шевчук О. И. Результаты исследований уровня моря в РГГМУ // Гидрометеорология и экология. 2020. № 60. С. 269—305.
13. Chubarenko B., Margoński P. The Vistula lagoon // Ecology of Baltic coastal waters. / U. Schiewer (Ed.). Berlin, Heidelberg: Springer. 2008. P. 167—195. doi: 10.1007/978-3-540-73524-3_8.
14. Боскачёв Р. В., Чубаренко Б. В. Анализ изменчивости гидрологических характеристик на устьевом участке реки Преголи (юго-восточная Балтика) // Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 644—674. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-644-674.
15. Михайлов В. Н., Горин С. Л. Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей эстуариев // Водные ресурсы. 2012. Т. 39, № 3. С. 243. EDN OXXVOT.
16. Симв В. Г., Морозов В. И., Фомина И. Н. Обменные процессы в проливах между эстуариями и морями. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». 2016. С. 172. ISBN 978-5-9909013-0-8.
17. Гидрометеорологический режим Вислинского залива [Текст] / Под ред. Н. Н. Лазаренко и А. Мавевского; Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Гос. гидрометеорол. ин-т Польск. Нар. Республики. Упр. гидрометеорол. службы ЛитССР. Морской филиал ГГМИ в Гдыне. Ленинград: Гидрометеиздат. 1971. С. 279.
18. «Расписание погоды». Лицензированная гидрометеорологическая кампания. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.rp5.ru>. Дата обращения: 25.04.2023.
19. Officer Ch.B. Physical Oceanography of Estuaries (and associated coastal waters) // N.Y.: Wiley Intersci. Publ. 1976. P. 465.

20. Guidelines on the study of seawater intrusion into rivers. Studies and reports in hydrology // Paris: UNESCO. 1991. V. 50: P. 138. ISBN 92-3-102765-4.
21. Лукашин В. Н., Кречик В. А., Клювиткин А. А., Стародымова Д. П. Геохимия взвешенного вещества в маргинальном фильтре реки Преголи (Балтийское море) // Океанология. 2018. Т. 58, № 6. С. 933—947. doi: 10.1134/S0030157418060102. EDN SKUHJF.

References

1. Mikhailov V. N., Mikhailova M. V., Magritsky D. V. Fundamentals of estuarine hydrology. Moscow: LLC «Publishing house TRIUMPH». 2018: 314 p. ISBN 978-5-89392-818-1. EDN LWFRFT. (In Russ.).
2. Povalishnikova E. S. Reasons for the penetration of sea water into rivers and its environmental consequences. *Vestnik Moskovskogo universiteta = Moscow University Bulletin*. 2001; 5 (3): (20—28). (In Russ.). EDN: XSSXGL.
3. Mikhailova M. V. Processes of seawater intrusion into river mouths. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2013; 40 (5): (483—498). doi: 10.7868/S0321059613050052. EDN QYXJGV. (In Russ.).
4. Markova L. L., Nechay I. Ya. Hydrological outline of the mouth areas of the Neman and Pregolya rivers. *Proc. GOIN*. 1960; (49): (118—187). (In Russ.).
5. Chubarenko B. V., Shkurenko V. I. Physical mechanisms of salt water penetration up the Pregole River taking into account the influence of the bottom relief. *Fizicheskie problemy ekologii (ekologicheskaya fizika) = Physical problems of ecology (ecological physics)*. 2001; (7): (80—88). (In Russ.).
6. Domnin D. A., Sokolov A. N. Features and regularities of the inflow of brackish masses in the lagoon-estuarine system of the Vistula Lagoon-Pregolya-Curonian Lagoon by means of contact measurement data and modeling. *Izvestiya KGTU*. Bulletin of KSTU. 2014; (35): (11—20). [in Russian].
7. Polunina Ju. Ju., Stont Zh. I. Wind effect on zooplankton distribution in the estuary of the Pregolya River (the Baltic Sea Basin) after technogenic transformation of its riverbed. *Morskoj biologicheskij zhurnal = Marine Biological Journal*. 2022; 7 (1): (78—92). (In Russ.). doi: 10.21072/mbj.2022.07.1.07. EDN WLTBGF.
8. Domnin D. A., Pilipchuk V. A., Karmanov K. V. Formation of inflow of saltish water in the lagoon-estuarine system of Vistula Lagoon catchment and Pregolya River as a result of wind surges. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Natural and technical sciences*. 2013; 6: (206—211). (In Russ.). EDN: RRREHH.
9. Chubarenko B., Domnin D., Navrotskaya S. et al. Transboundary Lagoons of the Baltic Sea (Chapter 6). [In] R. Kosyan (ed.) *The Diversity of Russian Estuaries and Lagoons Exposed to Human Influence, Estuaries of the World*. Switzerland: Springer. 2017. P. 149—191. doi: 10.1007/978-3-319-43392-9_6.
10. Stont J. I., Navrotskaya S. E., Chubarenko B. V. Long-term trends in the variability of hydrometeorological characteristics in the Kaliningrad region. *Okeanologicheskie issledovaniya = Oceanological Research*. 2020; 48 (1): (45—61). (In Russ.). doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(1).3.
11. Pavlovskii A. A., Shamshurin V. I. Influence of Baltic Sea level rise on historic and cultural heritage of Russia. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2021; (65): (681—693). doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-681-693.
12. Malinin V. N., Gordeeva S. M., Mitina Yu. V., Shevchuk O. I. Results of sea level studies at RSMU. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2020; (60): (269—305). (In Russ.).
13. Chubarenko B., Margoński P. The Vistula lagoon. Ecology of Baltic coastal waters. U. Schiewer (Ed.). Berlin, Heidelberg: Springer. 2008; 167—195. doi: 10.1007/978-3-540-73524-3_8.
14. Boskachev R. V., Chubarenko B. V. Analysis of the variability of hydrological characteristics at the mouth section of the Pregolya River (Southeast Baltic). *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2022; 69: (644—674). doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-644-674. (In Russ.).
15. Mikhailov V. N., Gorin S. L. New definitions, regionalization, and typification of river mouth areas and estuaries as their parts. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2012; 39(3): 243 p. EDN OXXVOT.
16. Simov V. G., Morozov V. I., Fomina I. N. *Obmennye processy v prolivah mezhdu estuariami i moryami*. Exchange processes in the straits between estuaries and seas. Sevastopol: SPC EKOSI-Gidrofizika Publ. 2016: 172 p. (In Russ.). ISBN 978-5-9909013-0-8.
17. *Gidrometeorologicheskij rezhim Vislinskogo zaliva*. Hydrometeorological regime of the Vistula Lagoon. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1971: 279 p. (In Russ.).

18. «*Raspisanie pogody*». «Weather schedule». (LLC) Licensed hydrometeorological company. Available at: <http://www.rp5.ru>. (accessed on: 05.04.2023). (In Russ.).
19. Officer Ch.B. Physical Oceanography of Estuaries (and associated coastal waters). N.Y.: Wiley Intersci. Publ. 1976: 465 p.
20. Guidelines on the study of seawater intrusion into rivers. Studies and reports in hydrology. Paris: UNESCO. 1991; (50): 138 p. ISBN 92-3-102765-4.
21. Lukashin V. N., Krechik V. A., Klyuvitkin A. A., Starodymova D.P. Geochemistry of suspended particulate matter in the marginal filter of the Pregolya River (Baltic Sea). *Okeanologiya = Oceanology*. 2018; 58(6): (856—869). doi: 10.1134/S0030157418060102. EDN SKUHJF.

Сведения об авторах

Надежда Вадимовна Двоеглазова, аспирант Балтийского федерального университета им. И. Канта (г. Калининград); ст. лаборант лаборатории прибрежных систем Атлантического отделения (г. Калининград) Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (г. Москва), nadya2eyes@mail.ru.

Борис Валентинович Чубаренко, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией прибрежных систем Атлантического отделения (г. Калининград) Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (г. Москва), chuboris@mail.ru.

Information about authors

Nadezhda Vadimovna Dvodeglazova, PhD student of Immanuel Kant Baltic Federal University (Kaliningrad), assistant of the Laboratory of Coastal Systems Study, Atlantic Branch (Kaliningrad) of the Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences (Moscow).

Boris Valentinovich Chubarenko, PhD (Phys. and Math. Sci.), Head of the Laboratory for Coastal Systems Study, Atlantic Branch (Kaliningrad) of the Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences (Moscow).

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 9.07.2023

Принята к печати после доработки 15.11.2023

The article was received on 9.07.2023

The article was accepted after revision on 15.11.2023