

ПРИДОННЫЕ ИНТРУЗИИ СОЛОНОВАТОЙ ВОДЫ ИЗ КАЛИНИНГРАДСКОГО ЗАЛИВА В РУКАВ НИЖНЯЯ ПРЕГОЛЯ¹

© 2025 г. Р. В. Боскачѳв^а, *, Б. В. Чубаренко^б

^аКалининградский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Северо-Западное управление УГМС,
Калининград, 236022 Россия

^бИнститут океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, 117997 Россия

*e-mail: combat.130@mail.ru

Поступила в редакцию 28.03.2024 г.

После доработки 11.06.2024 г.

Принята к публикации 11.06.2024 г.

Впервые выполнен анализ связи нагонного и интрузионного механизмов и временной изменчивости вертикальной стратификации вод во время проникновения солоноватой воды Калининградского залива в русло рук. Нижняя Преголя с гидрометеорологическими условиями. Выполнена количественная оценка дальности проникновения солоноватой воды в русло рук. Нижняя Преголя посредством методики Кайлегана. С использованием данных гидрологических измерений за период 10.09.2019–27.03.2020 и особенностей геоморфологии русла оценена возможность реализации проникновения солоноватой воды вверх по руслу рук. Нижняя Преголя до точки бифуркации р. Преголи с последующим перетоком в рук. Дейма.

Ключевые слова: устьевая область, интрузии соленой воды, вертикальная стратификация, уровень воды, нагонный ветер.

DOI: 10.31857/S0321059625010097 EDN: UXPCNH

ВВЕДЕНИЕ

Исследованию устьевых областей рек с эффектом проникновения солоноватой воды посвящено достаточно много работ [20]. В качестве примеров рассматривались интрузии соленой воды Средиземного моря в устья рек Рона, Тибр (Тирренское море) и По (Адриатическое море), а также соленых вод Тихого океана в устье р. Колумбии [16]. Выполнялись исследования толщины и дальности проникновения интрузий морской воды Белого моря в устье р. Кеми в условиях приливного воздействия [8].

Ситуациям взаимодействия морской и речной воды в условиях штормовых нагонов в не-приливных морях посвящено не так много работ. Фиксировались случаи обратных уклонов водной поверхности р. Даугавы от Рижского залива ниже г. Риги при нагонных колебаниях уровня воды в устье со скоростью обратного течения солоноватой воды Балтийского моря до

0.3–0.4 м/с [19]. В работе [17] с использованием гидролого-морфологических характеристик определялись размеры зон смешения и глубины проникновения солоноватой воды в русла рек Дунай (Кикийский рукав), Волга, Урал и Дон.

Для Дона активно внедряются методы численного моделирования [7, 21, 22]; и в работе [9] на основе математического моделирования установлено, что в настоящий момент дальность проникновения вод Азовского моря в рукава дельты Дона увеличилась в 2–3 раза по сравнению со второй половиной XX в.

Моделирование гидролого-морфологических процессов в дельтах рек, помимо Дона, выполнялось также для Яны, Дуная, Кубани и Волги [1], а в работе [3] определялась деформация русла и перераспределение стока по рукавам в устьевой части р. Терек вследствие наводнения 2002 г.

Один из устьевых рукавов Преголи – Нижняя Преголя (рис. 1), впадает в Калининградский залив, воды которого имеют промежуточную соленость (в среднем до 4 PSU в восточной части залива) и могут внедряться в русло Нижней Пре-

¹ Сбор данных проведен при поддержке РФФИ (проект 19-35-90108). Анализ данных и подготовка настоящей публикации проведены при поддержке РНФ (проект № 24-44-20027).

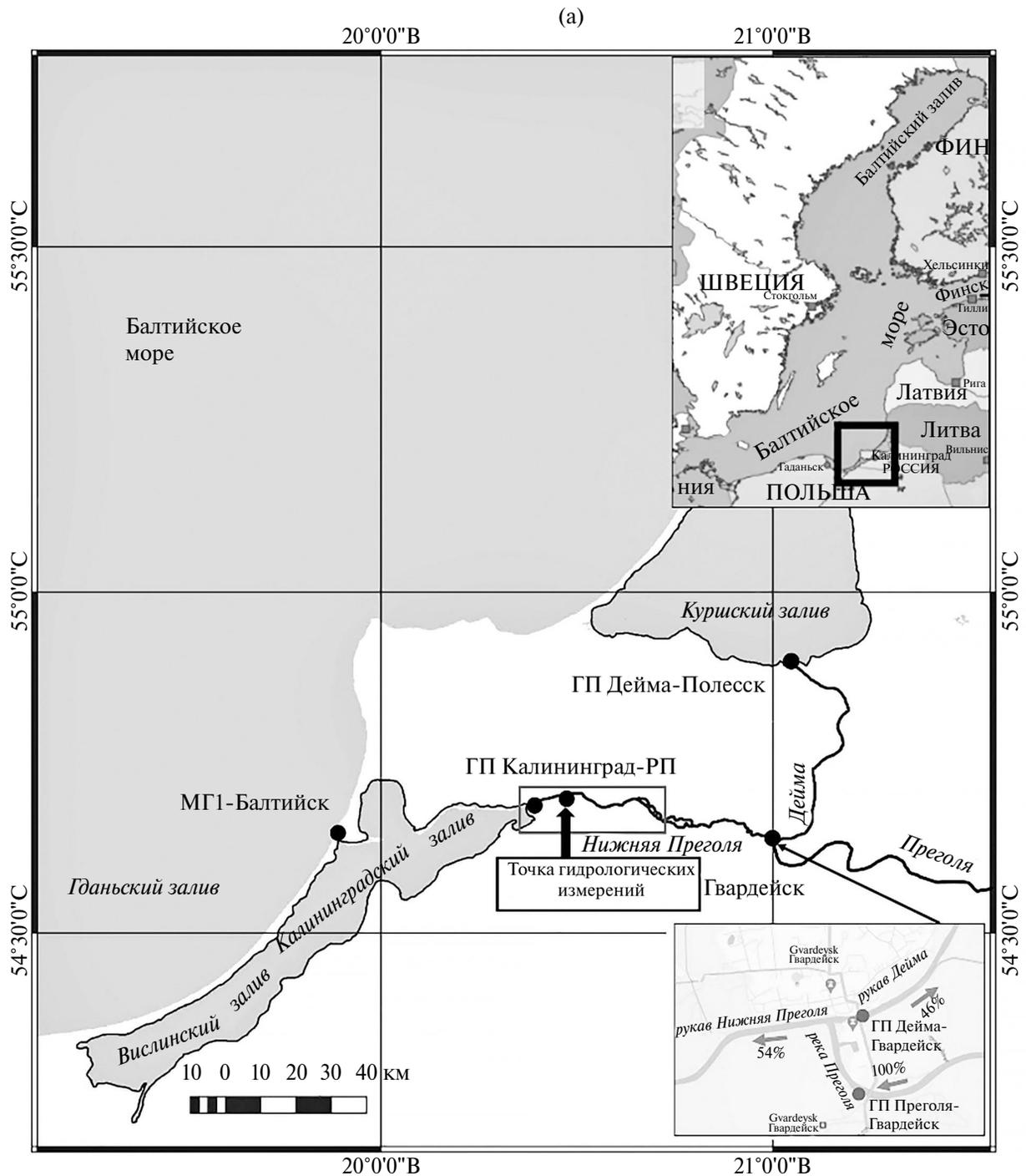


Рис. 1. а – Юго-Восточная часть Балтийского моря: Калининградский и Куршский заливы соединены рукавами Нижняя Преголя и Дейма, указаны места расположения гидрологических постов в городах Калининграде, Гвардейске и Полесске.

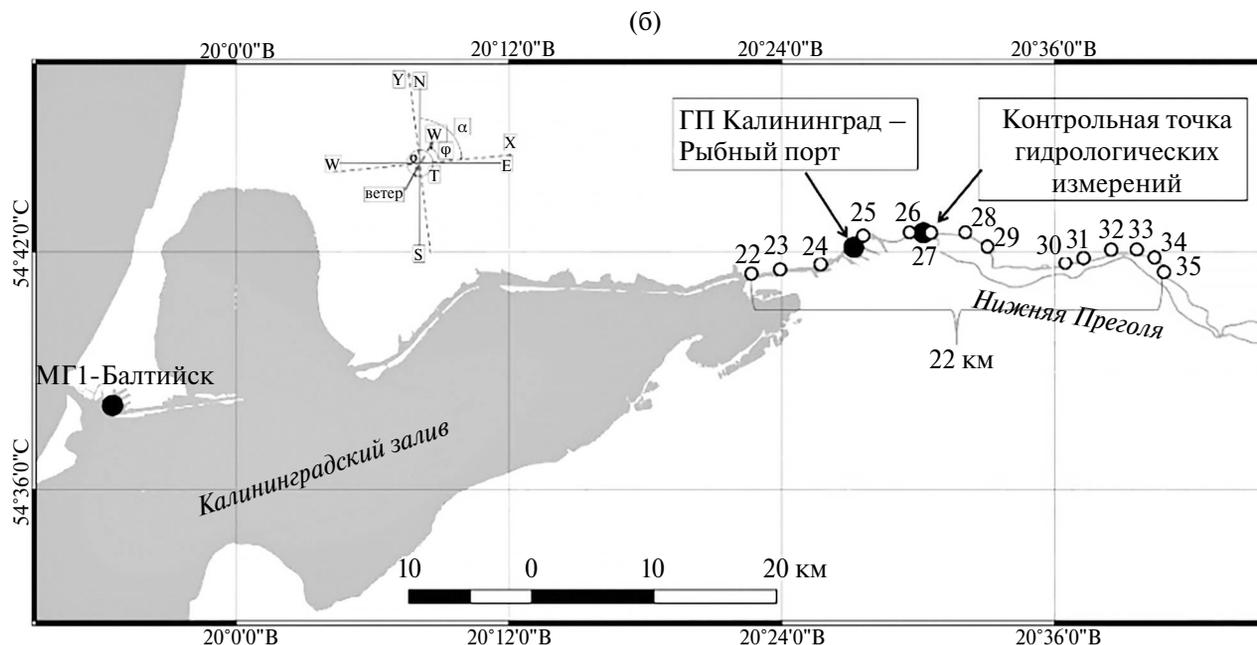


Рис. 1. Продолжение. б – нижний сегмент устьевое участка рук. Нижняя Преголя от разделения на протоки Старая Преголя (южный проток) и Новая Преголя (северный проток) до устья, система координат для определения вдольрусловой составляющей скорости ветра. 22–35 – точки мониторинговых обследований АО ИО РАН [24], контрольная точка вертикальных зондирований – между точками 26 и 27, водозаборы ЮВС-1 и ЮВС-2 – в районе точек 30–32.

голи в результате подъема уровня воды в заливе за счет колебаний уровня в Балтийском море и нагонного ветра западных направлений [10, 27, 29]. Эффекту проникновения солоноватой воды вверх по Преголе (рис. 1) посвящены работы по соленостным интрузиям [4, 23–26], натурные и модельные исследования [5, 6]. Актуальность и практическая значимость исследования этого эффекта связаны с возникновением геохимического барьера и угрозой блокировки водозаборной системы водоснабжения г. Калининграда в случае проникновения солоноватой воды вверх по руслу Нижней Преголи [26] до водонасосных станций ЮВС-1 и ЮВС-2 (рис. 1).

Возможности проникновения солоноватой воды в устье Преголи способствует малый уклон водной поверхности (в среднем 2 см/км) рук. Нижняя Преголя (от устья до г. Гвардейска) [2]. В момент нагонов воды с залива уклон водной поверхности на устьевом участке может быть значительно меньше или даже быть отрицательным (обратный уклон водной поверхности). Для примера – средний уклон равнинной части Волги составляет 6 см/км [18].

Ранее в [26] были выделены два механизма затока солоноватой воды в русло рук. Нижняя Преголя: интрузионно-адвективный (далее – интрузионный) – проникновение солоноватой воды вверх по течению в придонных слоях в условиях слабого или умеренного поверхностного стока; нагонно-адвективный (далее – адвективный) – полное заполнение всего русла реки водами практически одинаковой солености со слабой вертикальной стратификацией (перепад солености между придонным и поверхностным горизонтом < 1 PSU). В случае интрузионного механизма проникновение солоноватой воды осуществляются дальше вверх по руслу рукава.

На основе анализа литературных [25, 26] и фондовых данных сделан вывод, что обычный для осенне-зимнего периода нагонный подъем уровня длительностью 1–3 сут на фоне сезонных вариаций речного стока приводит только к кратковременному проникновению солоноватой заливной воды вверх по руслу рук. Нижняя Преголя, и ситуация 25.10.2000–27.10.2000 это подтвердила [24]. В настоящей статье ввиду

недостаточной изученности интрузионного механизма именно на него обращено внимание и выполнена оценка его реализации в период 10.09.2019–27.03.2020.

Цель статьи – по данным гидрологических измерений (10.09.2019–27.03.2020) зафиксировать проявления нагонного и интрузионного механизмов при проникновении солоноватой воды вверх по руслу рук. Нижняя Преголя, проанализировать связь характеристик вертикальной стратификации с существующими в рассматриваемый период гидрометеорологическими условиями (ветровая обстановка, уровень воды и атмосферные осадки), установить условия возникновения геохимического барьера на пути выносимых речным стоком водной взвеси и загрязняющих веществ (в том числе микропластика), а также оценить возможность глубокого проникновения солоноватой воды в русло рук. Нижняя Преголя вплоть до точки бифуркации в Гвардейске.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Гидрологические измерения

Для получения данных о гидрологической структуре вод и о наличии интрузий солоноватой воды Калининградского залива выполнена программа ежедневных измерений СТД-зондом (“Valeport SWIFT-SVP”) в период с 10.09.2019 по 27.03.2020. Зонд измеряет электропроводность, а соленость воды рассчитывается с использованием встроенного программного обеспечения в практических единицах солености (PSU). Измерения выполнялись в 9 км вверх по течению от устья рук. Нижняя Преголя – в контрольной точке [24] для эстуарной части устьевого участка рук. Нижняя Преголя (центральная часть Калининграда, территория Музея мирового океана), расположенной на 300 м ниже по течению, чем точка 27 (рис. 16). Измерения проводились в режиме вертикального профилирования от поверхности до глубины 7.5 м с дискретностью 0.15–0.2 м.

Для оценки основных воздействующих на проникновение солоноватой воды гидрометеорологических факторов сопоставлялись параметры ветра, уровня воды и при необходи-

мости количество выпавших осадков в период гидрологических измерений – 10.09.2019–27.03.2020.

Ветровая обстановка

Ветровая обстановка анализировалась по данным наблюдений МГ-1 Балтийск (Росгидромет) (рис. 1а) с дискретностью 1 раз в 3 ч (8 раз в сутки в гидрометеорологические сроки 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 и 21 ВСВ). Используются данные ежечасных наблюдений (Росгидромет) за уровнем воды на гидрологическом посту (ГП) Калининград – Рыбный порт (рис. 1), которые преобразованы во временную серию среднего за 3 ч уровня, заданного на гидрометеорологические сроки ВСВ (каждые 3 ч, для дальнейшего сопоставления с вдольрусовым ветром). Также в работе использованы ежесуточные данные о выпавших атмосферных осадках, полученные на объединенной гидрометеорологической станции (ОГМС, Росгидромет) г. Калининграда, которая находилась в то время в восточной части Калининграда.

Расход воды

Используются данные наблюдений за расходом воды (Росгидромет) на гидрологических постах Преголя–Гвардейск и Дейма–Гвардейск (рис. 1а), выполнявшихся с дискретностью раз в сутки. Расход воды рук. Нижняя Преголя определялся так:

$$Q_{\text{ниж преголя}} = Q_{\text{преголя}} - Q_{\text{дейма}}, \quad (1)$$

$Q_{\text{преголя}}$ – проходящий расход р. Преголи,
 $Q_{\text{ниж преголя}}$ – расход рук. Нижняя Преголя, $Q_{\text{дейма}}$ – расход рук. Дейма.

Методика расчета продольной составляющей ветра для р. Преголи

Для определения степени влияния ветра на проникновение солоноватой воды в реку проведен расчет величины вдольрусовой составляющей скорости ветра в устье рук. Нижняя Преголя (рис. 16). Ось X системы координат (рис. 16) – направление устьевой части русла рукава (положительное направление – вверх по течению),

ось Y – перпендикуляр к этому направлению. Продольная составляющая ветра рассчитана по формулам (2) и (3):

$$W_{\text{продол}} = W_a \cos \varphi, \quad (2)$$

$$\varphi = 180^\circ - (\gamma - \alpha_0) = 180^\circ + \alpha_0 - \gamma, \quad (3)$$

α_0 – азимут (от северного на правления по часовой стрелке, равен 81°) положительного направления оси X ; W_a – модуль скорости ветра; γ – направление ветра по данным стандартных измерений (азимут – навстречу ветру).

Характеристики стратификации

Для описания вертикальной структуры соленостного клина в любой его точке используются величины солености в придонном S_{bot} и поверхностном S_{surf} слоях, перепад солености между поверхностным и придонным слоями ($\Delta S = S_{\text{bot}} - S_{\text{surf}}$) и средняя по глубине соленость S_{avr} , которая в общем случае отличается от среднего арифметического между придонной и поверхностной соленостью $(S_{\text{bot}} + S_{\text{surf}})/2$, так как профиль солености не всегда линейный. Эти же величины использованы для оценки параметра стратификации (4), предложенного в [31, 33] и активно используемого в работах [9, 11, 12, 14]:

$$n = \Delta S / S_{\text{avr}} = (S_{\text{bot}} - S_{\text{surf}}) / S_{\text{avr}}. \quad (4)$$

Методики оценки дальности проникновения солоноватых вод

Важность определения дальности проникновения солоноватой воды Калининградского залива связана с угрозой блокировки водозаборов Калининграда, и даже с возможностью проникновения солоноватой воды в русло рук. Нижняя Преголя вплоть до точки бифуркации русла в Гвардейске с дальнейшим перетоком по руслу рук. Дейма в пресноводный Куршский залив [28].

Методика расчета плотностной скорости и дальности проникновения солоноватой воды (по Кейлегану) ранее использованы в [30] для русла р. Даугавы (Западная Двина), гидроло-

гические и морфометрические условия которой схожи с условиями Преголи. Формула для оценки дальности проникновения L_s (прямая зависимость от плотностных чисел Фруда Fr_p и Рейнольдса Re_p выведена Кейлеганом в 1957 г. на основании лабораторных опытов в виде [12, 32]):

$$L_s = Ah(Re)^{1/4} Fr_p^{-3}, Fr_p < 1. \quad (5)$$

Впоследствии (в 1966 г.) формула для L_s была уточнена и представлена в виде (6) [12, 30, 32]. Клин соленой воды начинает проникать в реку, когда скорость (и расход) ниже пороговых значений, т. е. критической скорости течения (или плотностной скорости) V_r^{cr} и критического расхода Q^{cr} речной воды:

$$L_s = Kh(Re_p)^{1/4} (Fr_p)^{-5/2}, Fr_p < 1, \quad (6)$$

$Re = (V_r h)/\nu$ – число Рейнольдса,

$$Re_p = (V_p h)/\nu - \text{его значение при критической скорости}, \quad (7)$$

$$Fr_p = V_r/V_p - \text{плотностное число Фруда}, \quad (8)$$

$$V_p = V_r^{\text{cr}} = (g h (\Delta\rho/\rho_m))^{1/2} - \text{критическая (плотностная) скорость}, \quad (9)$$

$$Q_r^{\text{cr}} = A V_r^{\text{cr}} = B h^{3/2} (g \Delta\rho/\rho_m)^{1/2} - \text{критический расход}, \quad (10)$$

K – эмпирический коэффициент; h – глубина речного русла; A – площадь сечения русла; B – эффективная ширина русла ($B = A/h$); ν – кинематическая вязкость; V_r – средняя по глубине скорость течения реки; ρ_s – плотность соленой воды, поступающей в эстуарий; ρ_r – плотность речной воды; $\Delta\rho = \rho_s - \rho_r$ – разница плотностей; $\rho_m = (\rho_s + \rho_r)/2$ – плотность смешанной воды.

На первый взгляд может показаться, что формулы (5) и (6) существенно различаются за счет использования в (5) числа Re , зависящего от скорости потока, а в (6) – критического значения числа Рейнольдса Re_p , которое зависит только от глубины и разности плотностей; но если переходить от выражений в виде безразмерных параметров (5)–(6) к явной зависимости от глу-

бины русла и скорости потока, то оказывается, что они очень схожи и лишь немного отличаются степенями одних и тех же входных параметров.

$$L_s = A v^{-1/4} (g(\Delta\rho/\rho_m))^{3/2} h^{11/4} V_r^{-11/4}, V_r < V_r^{cr}, \quad (5a)$$

$$L_s = K v^{-1/4} (g(\Delta\rho/\rho_m))^{11/8} h^{21/8} V_r^{-5/2}, V_r < V_r^{cr}. \quad (6a)$$

Для оценок также будет использована формула расчета плотностной дальности проникновения солоноватых вод, которая ранее использовалась для русла Яны и Дуная [13]. Дальность проникновения солоноватой воды L_s обратно пропорциональна плотностному числу Фруда Fr_ρ в виде:

$$L_s = a h / Fr_\rho^b, Fr_\rho < 1, \quad (11)$$

здесь параметр a индивидуален для каждого устья (например, для р. Яны $a = 485$, а для рук. Прорва р. Дунай $a = 327$); для р. Яны эмпирический параметр $b = 1.2$, а для рук. Прорва р. Дунай $b = 0.63$ [15].

В настоящей работе оценки критической скорости и расхода (формулы (9)–(10)), коэффициентов A , K , a и b (для формул (5), (6) и (11)) проведены по данным измерений непосредственно для рук. Нижняя Преголя.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Вертикальная структура поля солёности

Гидрологические вертикальные зондирования в контрольной точке [24] для эстуарной части устьевого участка рук. Нижняя Преголя в период 10.09.2019–7.03.2020 (6.5 мес.) показали, что зона смешения речных и заливных вод [23] мигрирует вверх и вниз по руслу реки, периодически захватывая акваторию, где проводились измерения (рис. 2). В эти моменты в исследуемом районе наблюдается вертикальная стратификация вод – солёность увеличивается с глубиной. В промежутках между этими событиями стратификация вод была слабая (разница величин солёности между поверхностным и придонным слоями < 1 PSU) либо фактически отсутствовала (рис. 3). Средняя толщина слоя придонной интрузии солоноватой воды (солёность > 1 PSU) за весь период наблюдений была ~ 4 м, а в активный период проникновение солоноватой воды доходило до 7.5 м, захватывая всю толщу вод.

Ветровая обстановка

Из 1600 наблюдений за ветром в исследуемый период (1 раз в 3 ч – 8 раз в сутки): в 50.7% (804

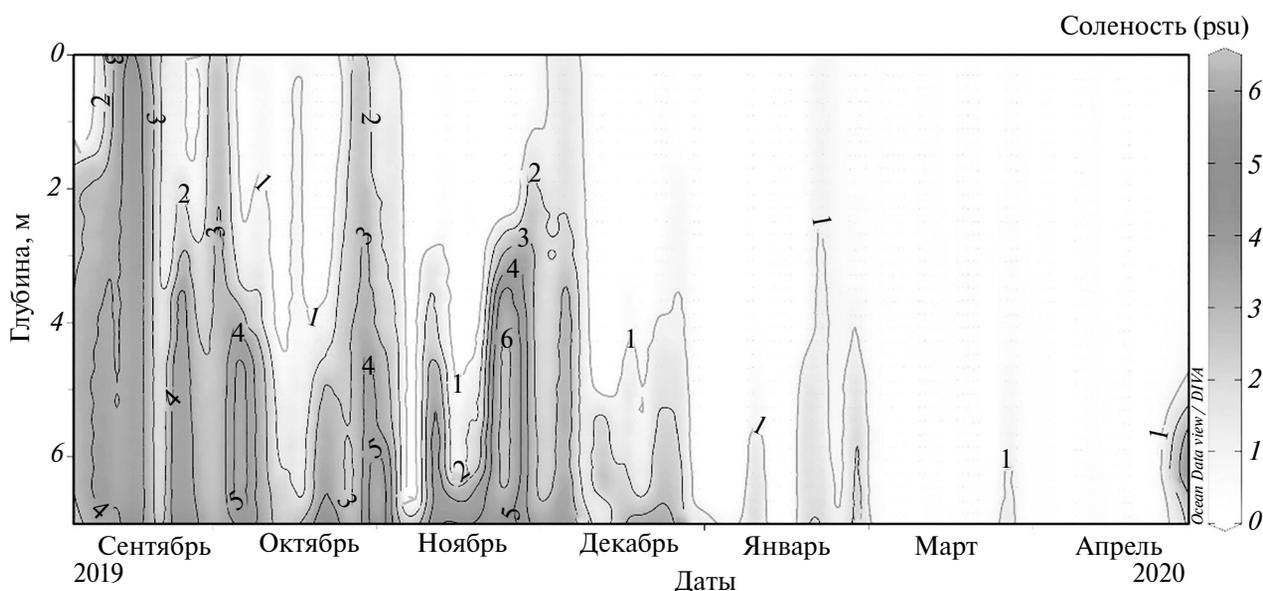


Рис. 2. Временная диаграмма изменчивости солёности по глубине в рук. Нижняя Преголя в контрольной точке (в эстуарной части устьевого участка, в г. Калининграде) (10.09.2019–27.03.2020). Изохалина 1 PSU показывает глубину залегания условной границы интрузии солоноватых вод.

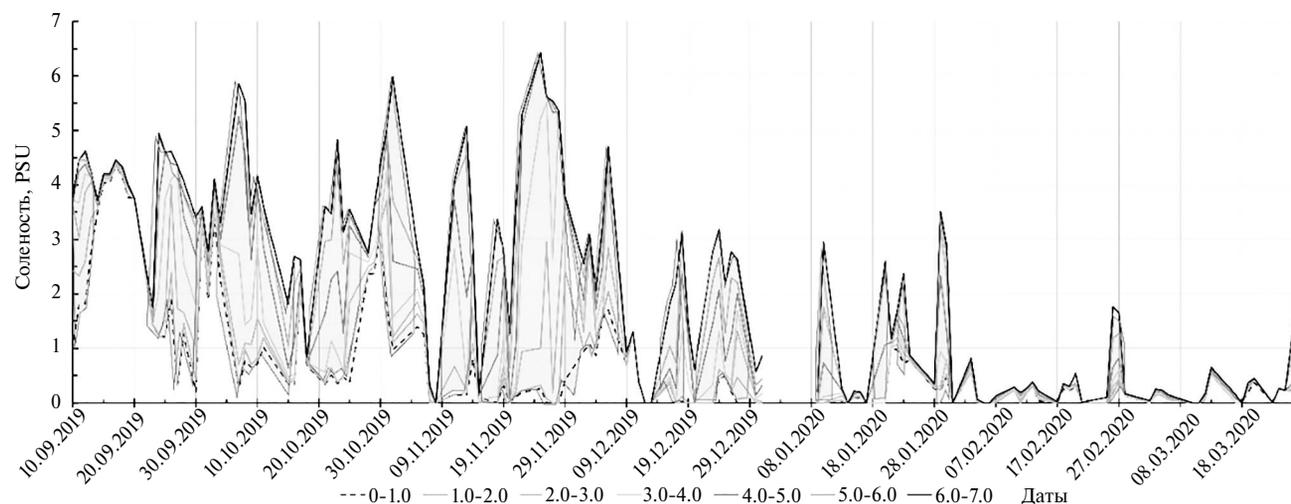


Рис. 3. Временной ход солёности воды в слоях толщиной 1 м в контрольной точке (в эстуарной части устьевое участка, в г. Калининграде) в период 10.09.2019–27.03.2020. Теневая заливка между графиками солёности в поверхностном и придонном горизонтах иллюстрирует периоды стратификации.

измерения) наблюдался ветер со скоростью до 5 м/с, в 41.8% (662) – 6–10 м/с и в 7.6% (120) – 11–18 м/с. Максимальные наблюдаемые за указанный период скорости ветра – 15 (16.09.2019 и 27.10.2019) и 18 м/с (12.03.2020), причем, во всех случаях это был ветер западных направлений.

Максимальная за период с 10.09.2019 по 27.03.2020 величина вдольрусловой составляющей ветра (вдоль рук. Нижняя Преголя вверх по течению) (рис. 4) составила 17.8 м/с (12.03.2020). В обратную сторону максимальный ветер (8 м/с) наблюдался 23.09.2019. Средняя величина вдольрусловой составляющей ветра за рассматриваемый период – 2.7 м/с. Нагонные ветры были зафиксированы 1074 раза ($V_{cp} = 4.9$ м/с), сгонные ветры – 512 раз ($V_{cp} = 1.8$ м/с). Штилевые условия наблюдались 14 раз из 1600 наблюдений.

Таблица 1. Повторяемость разных направлений ветра по трем градациям скорости (доля, %, и количество случаев при восьмикратных измерениях в сутки)

Скорость ветра, м/с	Направление ветра, доля от всего числа наблюдений (количество наблюдений), %								
	Всего	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
0–5	50.7 (804)	2.3 (37)	3.5 (56)	10.8 (171)	8.3 (131)	9.3 (147)	5.7 (90)	4.9 (78)	5.9 (94)
6–10	41.8 (662)	1 (16)	0.2 (3)	0.1 (1)	2.1 (34)	10.3 (164)	17.2 (272)	9.5 (151)	1.3 (21)
11–18	7.6 (120)	–	–	–	0.1 (1)	0.6 (10)	2.5 (39)	4.4 (69)	0.1 (1)
Сумма по направлению		3.3 (53)	3.7 (59)	10.9 (172)	10.5 (166)	20.3 (321)	25.3 (401)	18.8 (298)	7.3 (116)

Нагонные ветры преобладали и составили в совокупности 66% от всех измерений за период (рис. 5), к тому же практически все ветры скоростью > 5 м/с (44.5%) наблюдались только с этих направлений (5–10 м/с – в 37%, 11–18 м/с – в 7.5% от выполненных наблюдений) (табл. 1). Складывавшаяся ветровая обстановка время от времени создавала хорошие условия для подъема уровня воды и для развития нагонного механизма проникновения солоноватой воды в русло рук. Нижняя Преголя.

Временная изменчивость уровня воды

Для определения основных тенденций временной изменчивости и сглаживания резких скачков уровня воды рассчитаны скользящие средние за 5 сроков (15 ч) (рис. 4) для ГП Калининград – Рыбный порт (рис. 1). В период



Рис. 4. Временной ход вдоль русловой составляющей скорости ветра (по данным МГ-1 Балтийск) и уровня воды (ГП Калининград – Рыбный порт) в период 10.09.2019–27.03.2020. Представлены скользящие средние с 15-часовым окном осреднения (5 сроков). Положительное значение вдольрусловой составляющей скорости ветра соответствует направлению вверх по течению. Уровень воды представлен относительно условного нуля.

10.09.2019–27.03.2020 изменения уровня воды характеризуются следующими максимальной, минимальной отметками в условной системе высот: +128 см (12.03.2020) и –23 см (22.11.2019), т. е. колебания уровня воды в зоне смешения соленой и пресной воды имеют размах до 151 см, это результат нагонных ветров и сезонных изменений, связанных со стоком реки.

Определены основные периоды синхронизированного с вдольрусловым ветром роста уровня воды (на 56 см 12.09.2019–19.09.2019; на 38 см 25–29.10.2019, на 30 см 02.11.2019–05.11.2019, неравномерный рост на 55 см 29.11.2019–09.12.2019) и падения (20.09.2019–26.09.2019 на 47 см, 01.10.2019–05.10.2019 на 30 см, 17.10.2019–24.10.2019 на 35 см, 28.10.2019–02.11.2019 на 34 см, постепенное падение 11.11.2019–22.11.2019 на 50 см) (рис. 4).

При сопоставлении вдольрусловой составляющей ветра на МГ-1 Балтийск и уровня воды на ГП Калининград – Рыбный порт определена прямая корреляционная связь (коэффициент корреляции 0.57, т. е. корреляция заметная), пики максимума и минимума уровня воды и ветра в абсолютном большинстве случаев совпадают (рис. 4), что подтвердилось при дальнейшем анализе механизмов проникновения солоноватой воды в зависимости от ветровой обстановки и уровня воды.

Атмосферные осадки

В исследуемый период выпало 459 мм осадков, что соответствует среднему многолетнему за 30 лет (1989–2018 гг.). Треть дней (62 из 185) была без осадков. Определены наиболее интенсивные осадки: 16.09.2019–19.09.2019 – 63 мм, 28.09.2019–02.10.2019 – 42 мм, 12.10.2019 и 17.10.2019 по 16 мм, 13.11.2019–15.11.2019 – 15 мм, 29.11.2019–09.12.2019 – 44 мм (рис. 5).

Интрузии солоноватой воды

Для определения появления в точке измерений интрузии солоноватой воды авторы ориентировались на два критерия: соленость в нижних слоях должна была превышать 1PSU ($S_{\text{bot}} > 1 \text{ PSU}$), длительность такого превышения должна быть ≥ 1 сут. Поскольку за сутки проводилось только одно измерение, то выделялись периоды, когда соленость в придонном слое была $> 1 \text{ PSU}$ при двух и более измерениях подряд.

Длительность проникновения солоноватой ($> 1 \text{ PSU}$) воды Калининградского залива в придонном слое (6–7 м) составила 98 сут за период измерений, что составляет 50% всего периода, а в верхнем слое (0–1 м) – 43 сут (23%). Средняя по всем слоям длительность – 82 сут (41%). Средняя соленость воды по всем слоям за весь период –

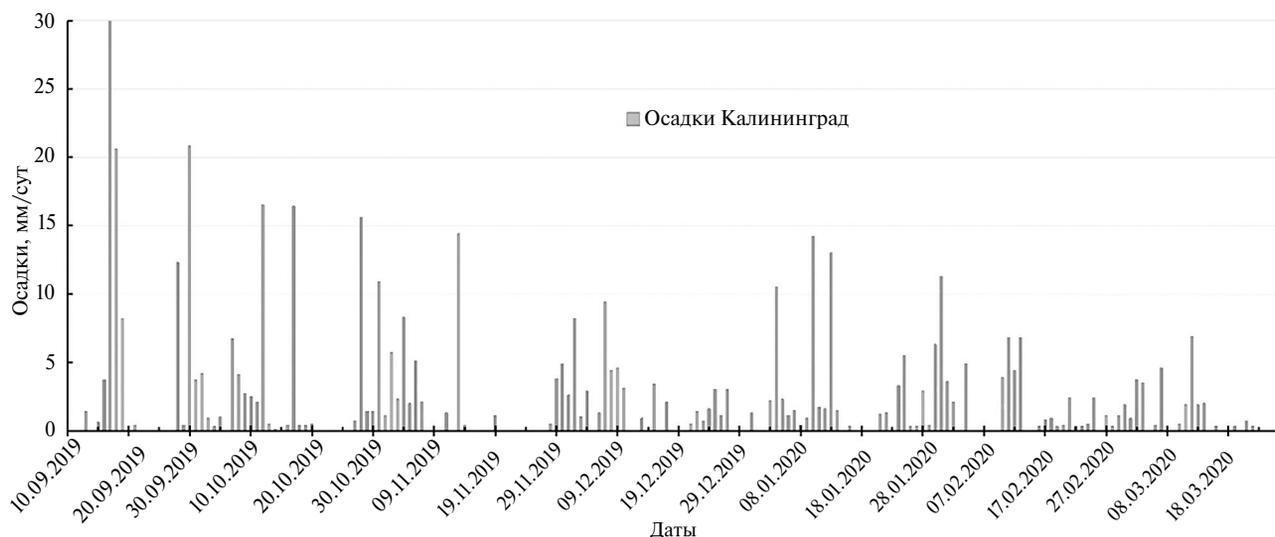


Рис. 5. Количество ежесуточных атмосферных осадков в период 10.09.19–27.03.2020 по данным ОГМС Калининград.

Таблица 2. Средние значения солёности воды по слоям в рук. Нижняя Преголя в центральной части г. Калининграда в период с 10.09.2019 по 27.03.2020 (6.5 мес.)

Период	Слой воды, м						
	0–1	1–2	2–3	3–4	4–5	5–6	6–7
Среднее значение солёности за весь период	0.7	0.7	0.9	1.3	1.6	1.9	2.1
Среднее значение солёности в периоды проникновения (≥ 1 PSU)	2.1	2.1	2.3	2.6	2.8	2.9	3.2
Суммарная длительность повышенных значений солёности (≥ 1 PSU), сут (доля от периода наблюдений, %)	43 (23)	51 (27)	61 (33)	72 (39)	89 (48)	105 (56)	118 (63)

1.3 PSU, а период проникновения солоноватой воды – 2.6 PSU (≥ 1 PSU) (табл. 2).

Оценка дальности проникновения солоноватой воды в русло рук. Нижняя Преголя

При разных внешних условиях могут возникать разные реализации процесса интрузионного проникновения солоноватой воды в русло Нижней Преголи. Проведем оценку возможности такого проникновения, используя оценочные формулы (5)–(10) для двух створов – т. 22, устье водотока Нижняя Преголя, и участок русла между точками 30 и 33 (где редко, но обнаруживается передний фронт солёностного клина).

С учетом того, что при нормальных условиях плотность заливной (солёность 4 PSU) и пресной воды равны 1002.9 и 999.73 кг/м³ со-

ответственно, то, согласно формулам (9)–(10), для створа т. 22 (глубина 9 м) и в среднем для створов т. 30–33 (глубина 4 м) критическая скорость равна 0.53 и 0.35 м/с, что с учетом площадей сечения дает критический расход 600 и 123 м³/с, обеспеченность которых 100 и 93.5%; т. е. в подавляющем большинстве случаев расход р. Нижняя Преголя меньше критического, значит создаются условия продвижения солёностного клина вверх по руслу.

С использованием данных о дальности проникновения солёностного клина для 25.10.2000–27.10.2000 [24] (проникновение изогалины 1 PSU до т. 35, т. е. на расстояние 21.5 км по отношению к устью, т. 22) и с учетом малого речного расхода воды в этот период (порядка 10 м³/с для рук. Новая Преголя) получены следующие оценки (табл. 3) для коэффициентов для двух вариантов методики Кайлегана и мето-

Таблица 3. Дальность проникновения солоноватой воды L_s Калининградского залива в русло рук. Нижняя Преголя при разных данных расхода воды Q и средней по створу скорости течения V для участка русла между точками 30–33

Q , м ³ /с (обеспеченность, %)	V , м/с	L_s , км (измерение)	L_s , км (формула (5.4.1)) $A = 1.13$	L_s , км (формула (5.4.2)) $K = 1.76$	L_s , км (формула (5.4.7)) $A = 515, b = 1.28$
123 (6.6)	0.35	Критические условия, после которых клин солоноватой воды не образуется			
10.6 (88.3)	0.06	21.5 (27.10.2000)	21.5 (калибровка)	21.5 (калибровка)	21.5 (калибровка)
8 (95)	0.05	—	46.9	43.7	31.1
7 (96.2)	0.04	—	67.8	61.1	36.9
6 (97.2)	0.035	—	103	89.7	45.0
5 (97.8)	0.035	—	170	141	56.8

дики обратной зависимости от числа Fr [12, 13, 31] (формулы (5), (6), (11)). По всем трем методам дальности проникновения соленостного клина сопоставимы. Следует подчеркнуть, что при малых расходах воды – 5–7 м³/с (обеспеченность 2.2–3.8%) – дальность проникновения соленостного клина сравнима с расстоянием от устья до разветвления Преголи на два рукава (в Гвардейске).

ОБСУЖДЕНИЕ

Параметр стратификации и действие механизмов осолонения

Согласно [16, 34–36], в зоне смешения речных и морских вод выделяют три типа перемешивания и стратификации вод, индикатор которых – параметр стратификации n (формула (4)): I – полное (хорошее) перемешивание и слабая стратификация ($n < 0.1$); II – частичное (умеренное) перемешивание и умеренная стратификация ($0.1 < n < 1$); III – слабое перемешивание и сильная стратификация, клин солоноватой воды ($n > 1$). Попытка применить этот параметр к имеющимся данным для контрольной точки измерений оказалась неудачной. При фактически нулевой солености на поверхности и линейной (или почти линейной) стратификации параметр, вычисленный по формуле (4), равен двум ($n = 2$) вне зависимости от абсолютной величины солености на дне. Например, случаи 0–0.5 PSU и 0–6.5 PSU (в поверхностном и придонном слоях соответственно) по этому параметру не различаются, хотя между ними явно есть различия по генезису. Соленость 6.5 PSU – это практически соленость Балтийского моря в его юго-восточной части.

Также возникает проблема использования параметра n в двух эквивалентных с точки зрения существующего вертикального перемешивания ситуациях. Например, при линейной стратификации в пределах 0.1–1.0 PSU и 3.1–4.0 PSU (в поверхностном и придонном слоях соответственно) возникает противоречие, так как значения параметра кардинально различаются: в первом случае $n = 2$, что означает слабое перемешивание, а во втором $n = 0.25$ – полное перемешивание.

Поэтому в работе, хотя и проводилась оценка параметра стратификации, основное внимание уделялось именно величине солености в придонном горизонте (S_{bot} , как показателю степени осолонения устьевое участка) и перепаду солености между придонным и поверхностным гори-

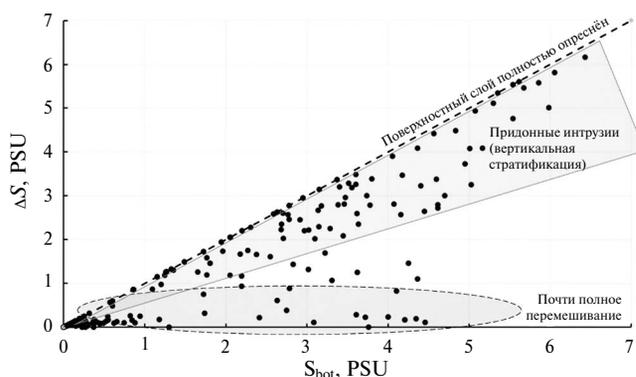


Рис. 6. Зависимость перепада солености в столбе воды ΔS от солености придонного слоя S_{bot} по данным в контрольной точке (в эстуарной части устьевое участка, в г. Калининграде) (10.09.2019–27.03.2020). Отмечены область почти полного перемешивания (перепад < 1 PSU), область существования придонных интрузий и, соответственно, развитой вертикальной стратификации. Предельная линия (пунктир) – верхний слой полностью распреснен.

зонтами ($\Delta S = S_{\text{bot}} - S_{\text{surf}}$) как показателю вертикального градиента солености (рис. 6).

На диаграмме на рис. 6, построенной по всем имеющимся данным, полученным в контрольной точке эстуарной части р. Нижняя Преголя (10.09.2019–27.03.2020), отмечены две области: область почти полного перемешивания, когда перепад солености между придонным и поверхностным горизонтами < 1 PSU, и область существования придонных интрузий и, соответственно, развитой вертикальной стратификации. Предельный случай стратификации – ситуация, когда поверхностный слой полностью распреснен, значит, перепад солености равен солености в придонном слое, т. е. соответствующая этому

случаю главная диагональ на рис. 6 – предельная линия. Диаграмма на рис. 6 иллюстрирует также, что случаев стратификации, или осолонения придонного слоя по интрузионному механизму, гораздо больше, к тому же соленость в придонном слое при действии такого механизма оказывается существенно большей (в исследуемом случае – до 6.5 PSU), чем при действии нагонного механизма, приводящего к почти полному вертикальному перемешиванию (в последнем случае соленость достигала только 4.5 PSU).

Условия стратификации

В течение почти трехмесячного периода (09.09.2019–09.12.2019) городской участок

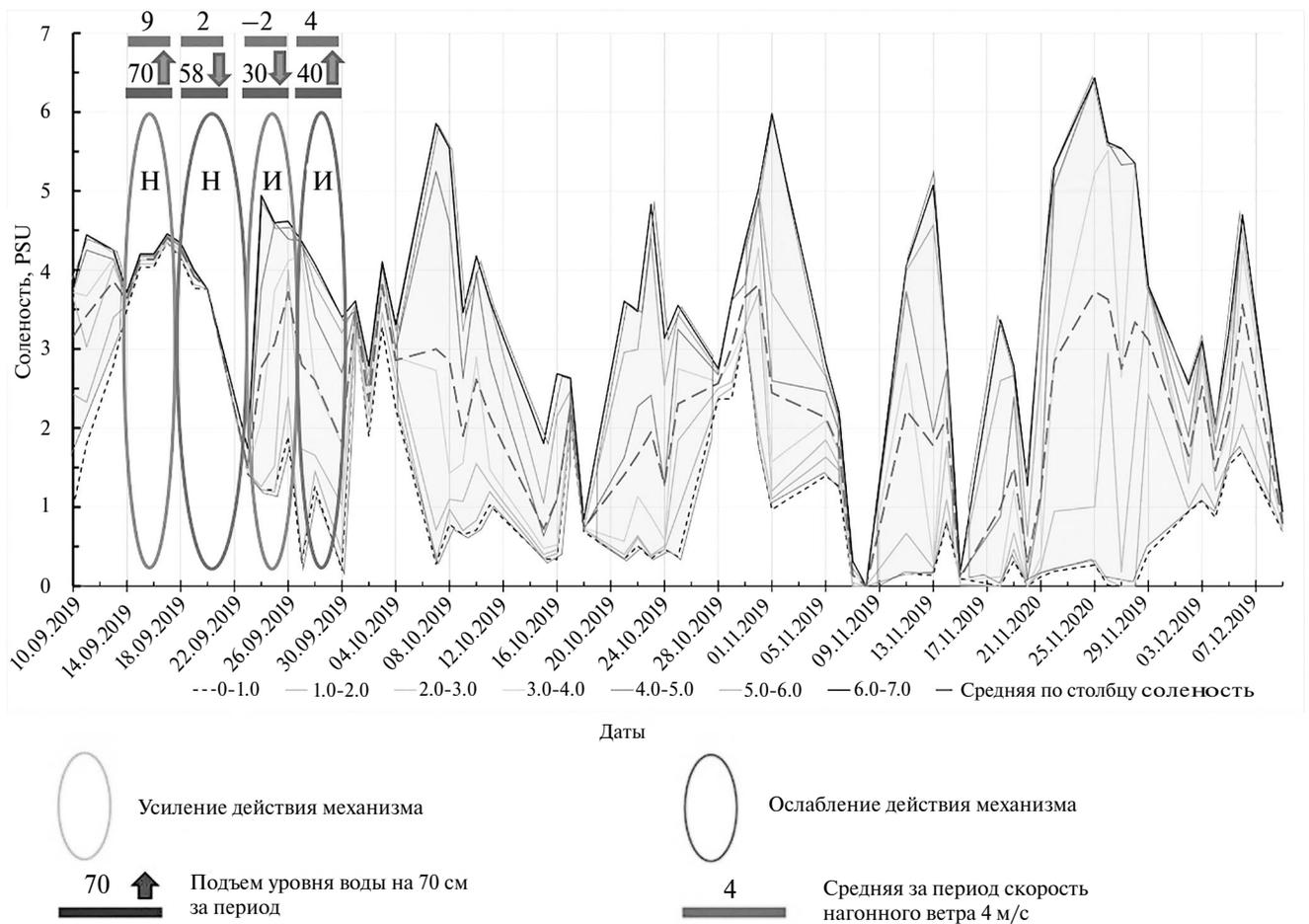


Рис. 7. Временной ход солености воды (усреднение по 1-метровым слоям) в контрольной точке (в эстуарной части устьевое участка, в г. Калининграде) в выделенный период активной стратификации солоноватой воды 10.09.2019–09.12.2019. Условия вертикальной стратификации (затененные участки) чередуются с условиями хорошего вертикального перемешивания, отмечены примеры длительного действия интрузионного (И) и нагонного (Н) механизмов. Для этих ситуаций представлены характеристики хода уровня воды и вдольруслового ветра (положительная скорость – при нагоне).

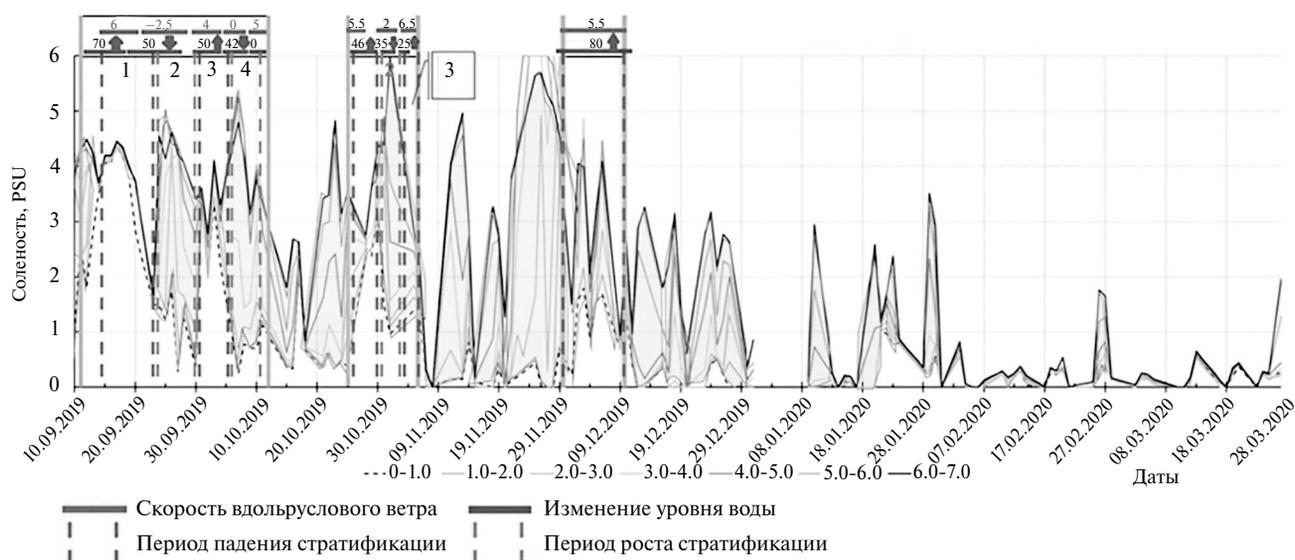


Рис. 8. Временной ход солености воды (усреднение по 1-метровым слоям) в контрольной точке (в эстуарной части устьевого участка, в г. Калининграде) в период гидрологических измерений 10.09.2019–27.03.2020. Отмечены примеры периодов роста и падения стратификации на фоне примеров реализации интрузионного и нагонного механизмов.

рук. Нижняя Преголя был захвачен солоноватыми водами (средняя соленость > 1 PSU), причем большую часть времени сохранялись условия вертикальной стратификации (затененные области маркируют периоды, когда разница между солености верхнего и придонного слоев > 1 PSU) (рис. 7, 8). Моменты полного вертикального перемешивания были достаточно редки – 14.09.2019–23.09.2019; 01.10.2019–04.10.2019, 17.10.2019–18.10.2019 и 28.10.2019–20.10.2019; 07.11.2019–8.11.2019 и 15.11.2019.

Ситуация менялась в зависимости от действия режимобразующих факторов (уровень воды, осадки, вдольрусловой ветер), но в целом, городской участок значительно осолонялся (до средней по столбу воды солености от 3 до в 4.5 PSU) шесть раз за этот трехмесячный период (14.09.2019–20.09.2019, 24.09.2019–27.09.2019, 01.10.2019 и 04.10.2019, 30.10.2019–31.10.2019, 25.11.2019–26.11.2019 и 06.12.2019). Городской участок освобождался от солоноватой воды (средняя соленость падала фактически до нуля 08.11.2019, 15.11.2019 и 20.11.2019) или почти освобождался (средняя соленость становилась < 1.5 PSU 23.09.2019, 15.10.2019, 18.10.2019 и 04.12.2019) только в очень короткие периоды.

В декабре 2019 – январе 2020 г. (рис. 8) была зафиксирована постоянная смена условий – пять раз наступало некоторое осолонение (с максимумом в придонном слое до 2.5–3 PSU, а в среднем по слою – до 1.5 PSU), которое сменялось почти полным опреснением. Периоды осолонения–опреснения длились от нескольких дней до недели. В феврале и марте 2020 г. зона смешения сдвинулась ниже точки проведения измерений, и измерения показывали пресную воду или незначительные всплески солености до 0.5 PSU.

Специфика установления-исчезновения стратификации вод

Стратификация – индикатор проникновения солоноватой воды по интрузионному механизму. Рассмотрим подробно на примере периода существования условий стратификации (09.09.2019–09.12.2019) специфику возникновения и реализации этого механизма.

Периоды стратификации всегда начинаются с роста солености в придонном слое и, соответственно, разбиваются на две части: рост солености (23.09.2019–24.09.2019, 04.10.2019–07.10.2019, 18.10.2019–23.10.2019, 28.10.2019–01.11.2019, 09.11.2019–13.11.2019,

15.11.2019–18.11.2019, 20.11.2019–25.11.2019, 04.12.2019–06.12.2019) и уменьшение солености (24.09.2019–30.09.2019, 07.10.2019–15.10.2019, 23.10.2019–28.10.2019, 01.11.2019–06.11.2019, 13.11.2019–14.11.2019, 18.11.2019–20.11.2019, 25.11.2019–04.12.2019, 06.12.2019–08.12.2019) в придонном слое. Если при этом соленость в поверхностных горизонтах остается примерно на старом уровне (18.10.2019–25.10.2019, 09.11.2019–14.11.2019, 15.11.2019–29.11.2019), то реализуется интрузионный механизм проникновения солоноватой воды (при этом средняя соленость всегда повышается).

Если соленость в верхних слоях падает одновременно с ростом солености в нижних слоях (23.09.2019–30.09.2019, 04.10.2019–07.10.2019, 30.10.2019–01.11.2019, 06.12.2019–08.12.2019), то это означает перестройку из вертикально перемешанного (при нагоне) режима в стратифицированный режим в связи с опреснением верхних слоев за счет усиления стока реки и осолонения нижних слоев за счет ежекторного механизма.

Периоды отсутствия стратификации, но увеличения средней солености соответствуют развитию проникновения солоноватой воды по нагонному механизму. Так, уменьшение солености в придонном слое сопровождалось увеличением солености в верхних горизонтах (11.09.2019–14.09.2019, 16.10.2019–17.10.2019, 25.10.2019–28.10.2019, 01.11.2019–05.11.2019, 13.11.2019–14.11.2019, 18.11.2019–19.11.2019, 26.11.2019–03.12.2019), что было связано с усилением процесса перемешивания (т. е. средняя соленость по столбу воды примерно сохранялась). И это было начало реализации нагонного механизма.

А если соленость в верхних горизонтах остается примерно на том же уровне или уменьшается синхронно с соленостью нижних слоев (средняя соленость по столбцу падает), то это признак перехода к опресненному режиму за счет усиления стока реки (15.09.2019–23.09.2019, 01.02.2019–02.10.2019, 17.10.2019–18.10.2019, 05.11.2019–08.11.2019, 14.11.2019–15.11.2019, 19.11.2019–20.11.2019, 29.11.2019–02.12.2019, 03.12.2019–04.12.2019, 06.12.2019–09.12.2019). Например, в период 17.09.2019–23.09.2019 была

зафиксирована фаза отката солоноватой воды по всем слоям, причиной чего было одновременное падение уровня воды (на 50 см) в Калининградском заливе и выпадение обильных атмосферных осадков – 62.6 мм за четырехдневный период (16.09.2019–19.09.2019), что почти равно средней многолетней месячной норме.

Опреснение вод городского участка

Городской участок (где проводились измерения) освобождается от солоноватой воды в моменты, когда река опресняет городской участок, что всегда происходит под влиянием трех факторов – увеличенного стока реки за счет обильных атмосферных осадков, падения уровня в низовьях реки и отсутствия нагонного ветра. Накануне периодов опреснения городского участка (за одни сутки) вода всегда становится хорошо перемешанной. Причем, к результату опреснения приводит действие либо всех трех факторов, либо как минимум двух из них.

Выделены три периода длительностью в одни сутки, когда эти факторы совместились:

18.10.2019 – штиль, обильные осадки (17 мм 17.10.2019) и падение уровня на 43 см за 1 сут (17.10.2019–18.10.2019);

08.11.2019 – выпадение ежедневных осадков (26.6 мм за 7 сут) и падение уровня на 40 см за сутки и штиль;

16.11.2019 – осадки 14.8 мм (13.11.2019–15.11.2019), очень низкий уровень и сгонный ветер 2 м/с.

Далее представлены типовые примеры действия фаз усиления и ослабления в периоды реализации интрузионного и нагонного механизмов.

Усиление проникновения солоноватой воды по нагонному механизму

Усиление проникновения солоноватой воды по нагонному механизму наблюдалось в период 14.09.2019–17.09.2019 – ярко выраженный пример усиления нагонного механизма, когда существенный нагонный ветер сопровождается ростом уровня воды Калининградского залива, в результате чего при повышенной солено-

сти стратификация отсутствует. В этот период происходило развитие проникновения с ростом средней солености с 3.6 до 4.4 PSU, в верхних слоях (0–3 м) – с 3.6 до 4.4 PSU и нижних слоях (4–7 м) – с 3.7 до 4.4 PSU. Гидрометеобстановка: рост уровня воды на 70 см, скорость нагонного ветра $V_{\text{cp}} = 9$ м/с, $V_{\text{макс}} = 15$ м/с.

Период 17.09.2019–23.09.2019 – типичный пример ослабления нагонного механизма, когда слабеющий нагонный ветер сопровождается падением уровня воды. Происходило снижение средней солености во всей толще воды: в верхних слоях (0–3 м) с 4.4 до 1.5 PSU, нижних слоях (4–7 м) – с 4.4 до 1.5 PSU, такое же падение средней солености во всей толще воды. Гидрометеобстановка: падение уровня воды на 58 см, снижение скорости нагонного ветра до $V_{\text{cp}} = 2$ м/с, $V_{\text{макс}} = 8$ м/с.

Усиление проникновения солоноватой воды по интрузионному механизму

Усиление проникновения солоноватой воды по интрузионному механизму представлено в период 23.09.2019–26.09.2019. Средняя соленость в верхних слоях (0–3 м) была стабильна (~1 PSU) и сопровождалась ростом средней солености (с 1.5 до 4.3 PSU) в нижних слоях (4–7 м), при этом росла средняя соленость с 1.5 до 3.6 PSU. Гидрометеобстановка: падение уровня воды на 30 см, ветер сгонный со средней и максимальной скоростями 2.5 и 8 м/с соответственно. В указанный период, по всей видимости, сработал ярко выраженный интрузионный механизм с комфортной для данного механизма ветровой обстановкой, когда сгонный ветер сдерживает проникновения солоноватой воды в верхних слоях, но при этом не мешает проникновению в придонных.

Ослабление интрузионного механизма

Ослабление интрузионного механизма представлено в период 26.09.2019–30.09.2019. Наблюдались ослабление средней солености во всей толще воды – в верхних слоях (0–3 м) с 3.6 до 1.8 PSU, нижних слоях (4–7 м) – с 4.3 до 2.8 PSU; падение средней солености во всей толще воды – с 2.8 до 1.8 PSU. Гидрометеобстановка: рост уровня воды на 40 см, усиление нагонного ветра

($V_{\text{cp}} = 4$ м/с и $V_{\text{макс}} = 11$ м/с), атмосферные осадки – 41.4 мм (28.09.2019–02.10.2019) – начало реализации нагонного механизма.

Описанные примеры показали, что нагонный механизм возникает под влиянием вдольруслового (нагонного) ветра вверх по течению, сопровождается слабой стратификацией и, как правило, ростом уровня воды в устье рук. Нижняя Преголя. Интрузионный механизм возникает при отсутствии вдольруслового (нагонного) ветра, сопровождается усилением стратификации и падением уровня воды в устье.

В результате оценки двух фаз (усиление и ослабление) действия механизмов проникновения солоноватой воды стало очевидно, что фазы усиления нагонного и интрузионного механизмов существенно ярче выражены, что естественно ввиду того, что в фазу ослабления уже начинает действовать другой механизм.

Одновременную изменчивость вдольруслового ветра, уровня воды и проникновения солоноватой воды не всегда можно объяснить однозначно (пример – период 07.10.2019–10.10.2019), так как не представляется возможным на качественном уровне учесть доли влияния и все дополнительные факторы.

Оценка возможности интрузии солоноватой воды в русло рук. Дейма через рук. Нижняя Преголя

Анализ полученных расчетных данных по формулам (5), (6) и (9) показал, что при среднем расходе воды 5–7 м³/с в рук. Нижняя Преголя солоноватая вода может проникнуть в русло рук. Нижняя Преголя на > 56 км (табл. 3), т. е., в принципе, могут преодолеть всю длину рук. Нижняя Преголя и достигнуть точки бифуркации Преголи (г. Гвардейск) с последующим перетоком в рук. Дейма (в случае, когда такие условия сохраняются достаточно долгое время).

Для оценки возможности реализации проникновения солоноватой воды из Калининградского в Куршский залив за счет интрузионного механизма сопоставлены глубины залегания придонной интрузии солоноватой воды в г. Калининграде и профиль глубин рук. Нижняя Преголя (до

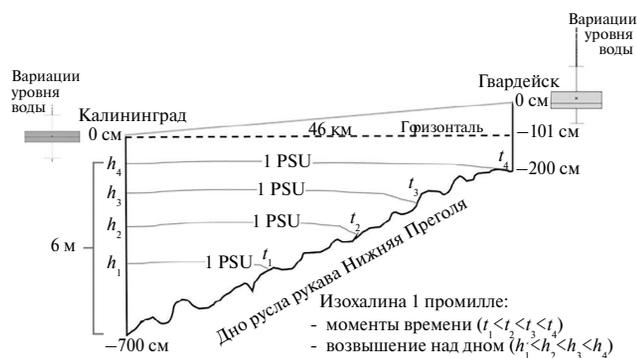


Рис. 9. Схема интрузионного проникновения солоноватой воды на участке р. Преголи от г. Калининграда до г. Гвардейск (расстояние от контрольной точки измерений — 46 км). Условно показаны положения изохалины 1 PSU (имеет небольшой наклон в сторону Гвардейска) в последовательные моменты времени по мере увеличения толщины солонистой интрузии в Калининграде. Пределы вариаций уровня воды в Калининграде и Гвардейске показаны в виде диаграмм размаха с указанием среднего, медиан и квартилей.

точки бифуркации в Гвардейске). При приведении высот и глубин русла рук. Нижняя Преголя в единую референтную систему определено, что дно русла в Гвардейске находится на ~ 1.5 м ниже среднего уровня воды в Калининграде (рис. 9). Значит, если толщина придонной солонистой интрузии будет ~ 6 м в Калининграде, что неоднократно фиксировались в период гидрологических измерений (рис. 2), интрузионный механизм способен обеспечить глубокое проникновение солоноватой воды в рук. Нижняя Преголя вплоть до реализации перетока в рук. Дейма.

С использованием полученных ранее данных [24] выполнен расчет скорости проникновения (продвижения) солоноватой воды Калининградского залива вверх по руслу рук. Нижняя Преголя — 2.2 км/сут. Учитывая эту скорость и то, что длина русла рук. Нижняя Преголя от контрольной точки измерений в эстуарном участке рук. Нижняя Преголя до точки бифуркации (г. Гвардейск) и разделения на два рукава — 46 км, можно оценить минимальное время, которое необходимо, чтобы интрузия солоноватой воды достигла Гвардейска — 21 сут; т. е. в течение 21 сут изохалина 1 PSU должна находиться не глубже горизонта 6 м в контрольной точке гидрологических измерений (территория Музея мирового океана, г. Калининград). Указанная длительность — минимальная

для достижения солоноватой водой точки бифуркации Преголи (г. Гвардейск).

Анализ результатов измерений солонистой структуры вод в контрольной точке в период 10.09.2019—27.03.2020 показал, что самым длительным периодом присутствия солоноватой воды в верхних горизонтах был 10.09.2019—27.09.2019 (всего 18 сут); следовательно, условия по солонистости (постоянная солонистость в поверхностных слоях ($0-2$ м) ≥ 1 PSU) (рис. 9) и длительности (от 21 сут) выполнены не были. Но учитывая то, что рассматривался случайно выбранный (исходя из технической возможности проведения измерений) период гидрологических измерений (6.5 мес.) и в его пределах был зафиксирован факт длительного проникновения солоноватой воды, когда солоноватая вода (≥ 1 PSU) поднималась выше 6 м над дном и держалась так порядка 18 сут (что всего на трое суток меньше необходимого минимума для достижения интрузией точки бифуркации в Гвардейске), можно утверждать, что проникновение солоноватой воды в русло рук. Дейма с последующим перетоком в Куршский залив весьма вероятен при благоприятных гидрометеорологических условиях.

ВЫВОДЫ

На основе обобщения результатов предшествующих работ по инструментальным измерениям проникновений солоноватой воды во время нагона из Калининградского залива в рук. Нижняя Преголя [28] сделан вывод, что переток солоноватой воды из Калининградского залива в Куршский залив наиболее вероятно может быть обеспечен за счет интрузионного механизма.

Определена четкая связь фаз интрузионного и нагонного механизмов с параметрами гидрометеорологической обстановки (ветер, уровень воды, атмосферные осадки).

С использованием теоретической оценки определено, что критический расход, после которого не возникает придонная интрузия солоноватой воды в русло Нижней Преголи, > 120 м³/с (обеспеченность 7%). Следовательно, солонистый клин большую часть времени расположен так, что, заходя в речное русло, обеспечивает возникновение геохимического барьера на пути вы-

носимых речным стоком водной взвеси и загрязняющих веществ (в том числе микропластика).

С оценкой дальности проникновения солоноватой воды в русло рук. Нижняя Преголя определено, что при расходе воды 5–7 м³/с (обеспеченность 96–98%) в рук. Нижняя Преголя солоноватая вода могут проникать в русло рук. Нижняя Преголя на > 56 км, т. е. преодолевать всю длину рук. Нижняя Преголя и достигать точки бифуркации Преголи (г. Гвардейск) с возможным последующим перетоком в рук. Дейма с той оговоркой, что такие условия сохраняются несколько недель.

Определено, что при толщине интрузии солоноватой воды ~6 м в контрольной точке рук. Нижняя Преголя (центральная часть Калининграда, территория Музея мирового океана) и длительности ее непрерывного существования ≥ 21 сут [24] может произойти проникновение солоноватой воды до точки бифуркации Преголи (г. Гвардейск) с возможным последующим перетоком в рук. Дейма и далее в пресноводный Куршский залив.

Показанная в работе возможность перетока солоноватой воды из Калининградского залива в Куршский залив в виде придонных интрузий по рук. Нижняя Преголя и оценка благоприятных для перетока условий дают ориентир для муниципальных служб г. Калининграда по использованию резервного водоснабжения в случае блокировки солоноватой заливной водой водозаборов городской системы водоснабжения (на рук. Нижняя Преголя).

Авторы благодарят сотрудников Северо-Западного бассейнового филиала “Росморпорт”, Калининградское отделение (и лично А.В. Шушарина) за содействие в проведении работ, сотрудников Калининградского ЦГМС — филиала Северо-Западного УГМС за оказанную поддержку, Р.Б. Закирова (АО ИО РАН) за помощь в оценках русловых характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алешкин С.А.* Математическое моделирование гидролого-морфологических процессов в неприливаемых дельтах рек. Автореферат дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2004. 27 с.
2. *Боскачëв 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: <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2022-69-644-674>
3. *Горелиц О.В., Землянов И.В., Павловский А.Е., Иллаев Т.С.* Деформации русла и перераспределение стока в пределах устья реки Терек после катастрофического наводнения 2002 года // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33. № 6. С. 677–685.
4. *Двоглазова 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. С. 87–104. DOI: [10.33933/2713-3001-2024-74-87-104](https://doi.org/10.33933/2713-3001-2024-74-87-104)
5. *Домнин Д.А., Пилипчук В.А., Карманов К.В.* Формирование затока солоноватой воды 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.
6. *Домнин Д.А., Соколов А.Н., Пилипчук В.А.* Особенности и закономерности затока солоноватых масс в лагунно-эстуарной системе Калининградский залив – Преголя – Куршский залив посредством данных контактных измерений и моделирования // Изв. КГТУ. 2014. № 35. С. 11–20.
7. *Землянов И.В., Павловский А.Е., Милютин И.Ю., Горелиц О.В., Сапожникова А.А.* Краткосрочный прогноз уровней воды в устьевой области р. Дон на основе гидродинамического моделирования // Вод. ресурсы. 2022. Т. 49. № 5. С. 596–607. <https://doi.org/10.31857/S0321059622050170>
8. *Зырянов В.Н., Чебанова М.К., Филатов Н.Н.* Интрузия морских вод в устья рек. // Вод. ресурсы. 2015. Т. 42. № 5. С. 492–503. <https://doi.org/10.7868/S032105961505020X>
9. *Клещенков А.В., Московец А.Ю.* Интрузии соленых вод в дельту реки Дона: закономерности развития и последствия // Наука юга России. 2021. Т. 17. № 3. С. 30–37. <https://doi.org/10.7868/S25000640210304>
10. *Маркова Л.Л., Нечай И.Я.* Гидрологический очерк устьевых областей рек Немана и Преголи // Тр. ГОИН. 1960. № 49. С.118–157.
11. *Михайлов В.Н., Добролюбов С. А.* Гидрология: учебник для вузов. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2017. 752 с.

12. Михайлов В.Н. Гидрологические процессы в устьях рек. М.: ГЕОС, 1997. 176 с.
13. Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек. М.: МГУ, 1998. 176 с.
14. Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. Гидрология. М.: Высш. шк., 2005. 463 с.
15. Михайлов В.Н., Михайлова М. В. Закономерности воздействия повышения уровня моря на гидрологический режим и морфологическое строение речных дельт // Вод. ресурсы. 2010. Т. 37. № 1. С. 3–16.
16. Михайлова М.В. Процессы проникновения морских вод в устья рек // Вод. ресурсы. 2013. Т. 40. № 5. С. 439–455.
17. Повалишников Е.С. Смещение речных и морских вод в устьях рек. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1995. 26 с.
18. Полонский В.Ф., Михайлов В.Н., Кирьянов С.В. и др. Устьевая область Волги: гидролого-морфологические процессы, режим загрязняющих веществ и влияние колебаний уровня Каспийского моря. М.: ГЕОС, 1998. 278 с.
19. Ромашин В.В. Динамика наносов в устьевой области реки Даугавы. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Л.: Гидрол. ин-т., 1964. 24 с.
20. Сафьянов Г.А. Эстуарии. М.: Мысль, 1987. 187с.
21. Чикин А.Л., Клещенков А.В., Чикина Л.Г. Моделирование проникновения соленых вод в основные рукава дельты Дона в зависимости от ветровой ситуации // Экол. безопасность прибреж. шельфовой зон моря. 2023. № 4. С. 56–72.
22. Чикин А.Л., Клещенков А.В., Чикина Л.Г., Коршун А.М. Численное исследование влияния ветровой ситуации в Таганрогском заливе на уровень воды в дельте Дона // Наука юга России. 2022. Т. 18. № 3. С. 21–28.
<https://doi.org/10.7868/S25000640220303>
23. Чубаренко Б.В. Зонирование Калининградского залива и устьевого участка реки Преголи по показателям гидролого-экологического состояния и в целях оптимизации мониторинга // Комплексное исследование процессов, характеристик и ресурсов российских морей Северо-Европейского бассейна. Вып. 2. Апатиты: Кольский НЦ РАН, 2007. С. 591–602.
24. Чубаренко Б.В., Двоеглазова Н.В., Боскачёв Р.В., Шушарин А.В. Пространственно-временная изменчивость гидрологических характеристик в зоне смешения реки Преголи (Юго-Восточная Балтика) и методические подходы к ее изучению // Океанологические исследования. 2024. Т. 52. № 1. С. 157–176. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(1).8
25. Чубаренко Б.В., Шкуренко В.И. Особенности гидрологической структуры вод в эстуарии реки Преголи и в точке стоянки НИС “Витязь” // Экологические проблемы Калининградской области и юго-восточной Балтики. Калининград: КГУ, 1999. С.41–47.
26. Чубаренко Б.В., Шкуренко В.И. Физические механизмы проникновения соленых вод вверх по реке Преголе с учетом влияния рельефа дна // Физические проблемы экологии (экологическая физика). Вып. 7. М.: МГУ, 2001. С. 80–88.
27. Chubarenko B., Domnin D., Navrotskaya S., Stont Zh., Chechko V., Bobykina V., Pilipchuk V., Karmanov K., Domnina A., Bukanova T., Topchaya V., Kilesa A. Transboundary Lagoons of the Baltic Sea (Chapter 6) // The Diversity of Russian Estuaries and Lagoons Exposed to Human Influence, Estuaries of the World / Ed. R. Kosyan. Switzerland: Springer Int. publ., 2017. P. 149–191.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-43392-9_6
28. Chubarenko B., Boskachev R. Hydraulic connection between Vistula and Curonian lagoons of the Baltic Sea // Baltica. 2021.V. 34. № 1. P. 81–94.
<https://doi.org/10.5200/baltica.2021.1.7>
29. Domnin D., Chubarenko B., Lewandowski A. Vistula lagoon catchment: Atlas of water use. Moscow: Exlibris Press, 2015. 106 p.
30. Guidelines on the study of seawater intrusion into rivers / prepared for the International Hydrological Programme by the Working Group of Project 4.4b (IHP-III) / Ed. H. van der Tuin. Paris: United Nations Educational, Sci. Cultural Organization, 1991. 137 p.
31. Hansen D.V., Rattry M. New dimensions in estuary classification // Limnol. and oceanogr. 1966. V. 11. № 3. P. 319–326.
32. Hinwood J.B. Estuarine salt wedges. Dock and Harbour Authority. 1964. № 45. P. 79–83.
33. Officer Ch.B. Physical oceanography of estuaries (and associated coastal waters). N.Y.: Wiley Intersci. Publ., 1976. 465 p.
34. Pritchard D.W. Estuarine circulation patterns // Proc. Am. Soc. Civ. Engrs. 1955. V. 81. № 717. P. 1–11.
35. Pritchard D.W. Estuarine hydrography // Adv. Eco-phys. 1952. № 1. P. 243–280.
36. Pritchard D.W. What is an estuary: A physical viewpoint // Estuaries. Washington: Am. Ass. Adv. Sci., 1967. Publ. 83. P. 3–5.

BOTTOM INTRUSIONS OF BRACKISH WATER FROM THE VISTULA LAGOON INTO THE DOWNSTREAM PREGOLYA BRANCH

R. Boskachev^{a, *}, B. Chubarenko^b

^a*Kaliningrad Centre for Hydrometeorology and Environmental Monitoring of the Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Pugacheva str. 16, Kaliningrad, 236022 Russia*

^b*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Nahimovskiy prospect 36, Moscow, 117997 Russia*

**e-mail: combat.130@mail.ru*

For the first time, the analysis (related to hydrometeorological conditions) of the temporal variability of vertical stratification, and the relationship between surge-induced and intrusive mechanisms of brackish water upstream penetration from the Vistula Lagoon into the Downstream Pregolya Branch. A quantitative assessment of the penetration depth of brackish water was made according to the Keulegan technique. Using the data of hydrological measurements for the period September 10, 2019 – March 27, 2020 and the features of the geomorphology of the riverbed, the possibility of the penetration of brackish water upstream the Downstream Pregolya Branch up to the bifurcation point of the Pregolya River with subsequent overflow into the Deyma Branch was estimated.

Keywords: estuary, saltwater intrusions, vertical stratification, water level, wind surge.