

УДК 504.454

**ПРОНИКНОВЕНИЕ КЛИНА СОЛОНОВАТЫХ ВОД В РЕКУ ПРЕГОЛЮ
КАК ПРИЧИНА ПЕРЕКРЫТИЯ ВОДОЗАБОРОВ г. КАЛИНИНГРАДА¹**© 2025 г. Н. В. Двоеглазова^а, *, Б. В. Чубаренко^а^аИнститут океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, 117997 Россия

*e-mail: nadya2eyes@mail.ru

Поступила в редакцию 10.07.2024 г.

После доработки 03.10.2024 г.

Принята к публикации 25.10.2024 г.

Интенсивные нагонные явления перераспределяют воды устья р. Преголи и препятствуют работе водозабора для нужд г. Калининграда. Невозможность осуществить водозабор при длительном (10–20 сут) проникновении солоноватых вод может создавать проблемы с водоснабжением. Данные (2020–2024 гг.) о перекрытии водоснабжения на водопроводной станции как индикаторы интенсивности проникновения клина солоноватых вод вверх по реке показали межгодовой рост количества и продолжительности таких случаев. Было проведено сравнение результатов измерений солёности в контрольной точке в середине устьевом участке реки с данными хлорности на водозаборе. Рассмотренные примеры остановки водоснабжения на 7–20 сут в августе и октябре 2023 г. позволили оценить условия по воздействию ветра, подъему уровня и начальному положению солёностного клина, способствующие его продвижению вверх по руслу реки вплоть до точки водозабора. Предложена регрессионная зависимость между величинами хлорности на водозаборе и солёности в середине устьевом участка р. Преголи, которая в первом приближении может быть использована для оценки значений хлорности на водозаборе в случае проникновения солоноватых вод.

Ключевые слова: эстуарии, устьевая зона смешения, штормовые нагоны, солёностный клин, интрузии солоноватых вод, натурные данные, водоснабжение, Юго-Восточная Балтика.

DOI: 10.31857/S0321059625030018 **EDN:** SZCNOS**ВВЕДЕНИЕ**

Образование в реках клина солоноватых вод [15, 20, 23, 26], сезонные вариации его положения [22, 24] оказывают воздействие на водоснабжение городов, расположенных на устьевых участках этих рек [21].

Наиболее активному проникновению солоноватых вод вглубь реки Преголи, расположенной в Юго-Восточной Балтике (рис. 1), способствует влияние нагонных явлений. Усиление повторяемости и скорости западных ветров, подъем уровня воды и уменьшение речного стока, действуя в совокупности, создают условия для движения солоноватых вод зоны смешения вверх по реке. Ранее наибольшая дальность распространения солоноватых вод (изогалина 1‰) от устья, регистрируемая натурными измере-

ниями, составляла 8–9 км [32, 33], 13.5 км [3, 30, 36] и 17 км [17] и, согласно недавно опубликованным данным [31] – 21 км (2000 г.). Модельный прогноз [13] подтвердился натурными данными в 2023 г., когда было зафиксировано проникновение более чем на 17 км вверх по реке [9, 31].

В р. Преголе (рукав Нижняя Преголя) интенсивные нагонные процессы приводят к активному проникновению солоноватых вод вверх по руслу, что обеспечивает несвойственное нормальному речному режиму осолонение вод устьевом участка и создает проблемы для функционирования расположенных на реке водозаборов системы водоснабжения г. Калининграда (рис. 1) [3, 6, 7, 9, 17, 32, 33]. Когда хлорность [28] воды на водозаборах превышает предельно допустимые значения (0.350 г/л), происходит прекращение на потребление воды из водохранилищ, рассчитанных на поддержание водоснабжения в течение 10–20 сут [6, 7, 9, 17]. Поэтому от продолжительности периодов нагонных явле-

¹ Анализ данных в рамках настоящего исследования выполнен за счет государственного задания ИО РАН № FMWE-2024-0025.

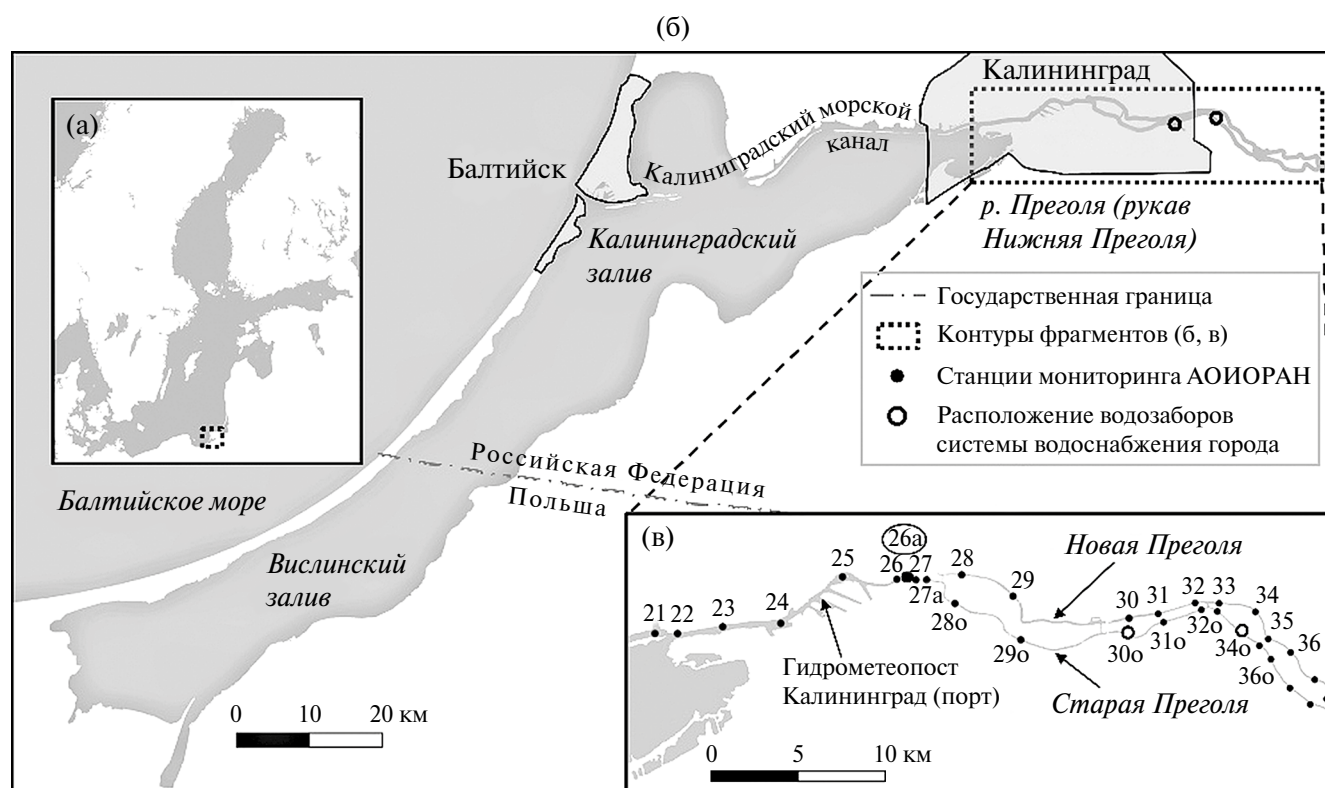


Рис. 1. Расположение станций гидрологических зондирований в пределах устьев участка рукава Нижняя Преголя (протоки Новая и Старая Преголя): а – локализация района исследований в юго-восточной части Балтийского моря; б – область смешения морских и пресных вод р. Преголи (Калининградский залив, Калининградский морской канал, устьевой участок Нижней Преголи); в – расположение точек регулярного мониторинга АО ИО РАН (точка 26а – контрольная точка гидрологических зондирований) и водозаборов системы водоснабжения г. Калининграда (точки 30о и 34о).

ний зависит, способны ли резервные водохранилища обеспечить работу системы водоснабжения без перебоев.

Распространение солоноватых вод в рук. Нижняя Преголя изучалось эпизодически с помощью натурных наблюдений [12, 30, 32, 33] и моделирования [3, 13], но без использования измерений, ведущихся на самой водозаборной станции. Повторяемость возможных перерывов в водоснабжении анализировалась по статистическим данным ГПКО “Водоканал” [4, 16, 17], но совместного анализа данных о распределении солености вдоль самой реки во время проникновения солоноватых вод и данных о величинах солености на водозаборах в этих работах не проводилось.

Ранее была предложена концепция мониторинга внедрения солоноватых вод Калинин-

градского залива в устьевой участок рук. Нижняя Преголя с помощью учащенных измерений вертикальной структуры вод (по солености) в контрольной точке [31]. В качестве таковой была предложена точка на причале Росморпорта в пределах территории Музея Мирового океана, расположенная на 400 м ниже по течению от МС “Витязь”.

Такие наблюдения за изменениями гидрологической структуры рук. Нижняя Преголя под воздействием проникновения солоноватых вод вверх по течению, проводившиеся с помощью ежедневных измерений в контрольной точке, позволили более детально изучить связь дальности проникновения с гидрометеорологическими условиями и идентифицировать механизмы проникновения в зависимости от изменения стратификации [31, 35]. Но эти данные также не были подкреплены параллельными измерениями на ЮВС-2.

Цель статьи – собрать коллекцию событий, во время которых проводилось перекрытие водозаборов ЮВС-2, и их характеристик (продолжительность, сопутствующие гидрометеорологические условия), проанализировать возможную связь между соленостью на водозаборе и в контрольной точке в г. Калининграде для получения оценочной эмпирической зависимости для значений хлорности на ЮВС-2 в случае проникновения солоноватых вод вверх по реке.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе анализируются данные о концентрации хлоридов на водозаборе ЮВС-2 за период 3.5 года (13.07.2020–13.02.2024) [10, 31] и данные о событиях перекрытия водозабора и, соответственно, перехода на резервное водоснабжение, полученные в ходе текущей работы ГПКО “Водоканал” г. Калининграда [6]. Они содержат ежедневную (и даже чаще, собираемую в нерегулярном режиме во время событий перекрытия водозабора) информацию о времени, количестве хлоридов в месте забора воды. Лабораторный анализ проб в ГПКО “Водоканал” проводится в соответствии с требованиями СанПиН 1.2.3685-21 [29] методом титрования азотнокислым серебром. Данные представляются в граммах на литр (г/л), что соответствует единице измерения – промилле (‰).

Качество воды, забираемой на ЮВС-2 из рук. Нижняя Преголя с глубины 1.5 м, контролируется на соответствие с указанными в нормативных документах предельно допустимыми концентрациям (ПДК). Забор воды прекращается, если значения хлорности воды в реке превышают значения 0.350 (г/л или ‰) [6, 29].

Для анализа использовались сведения об уровне воды по данным гидропоста Калининград – Рыбный порт и метеоданные для г. Калининграда [27] для всего периода наблюдений.

Инструментальные наблюдения (вертикальные зондирования гидрологическим зондом “Idronaut Ocean Seven 316Plus Multiparameter Probe”) за временной динамикой толщины и внутренней структуры соленостного клина со-

лоноватых вод проводились в контрольной точке, расположенной в центральной части устьевой зоны смешения рук. Нижняя Преголя [10] (причал “Росморпорта” в 8 км от устья выше по течению, выступающий в сторону фарватера до глубин 7 м (рис. 1)). Разовые зондирования выполнялись ежедневно в интервале 8:00–10:00 местного времени с 21.10.2022 по 02.12.2023 и с 18.04.2023 по 01.02.2024 [8, 31]. Из этого массива в статье использовались измерения в периоды с 7 по 14 августа (8 дней) и с 3 по 24 октября (21 день) 2023 г., во время которых происходили перекрытия водозабора.

Также в работе использовались данные гидрологических разрезов (точки 22–27а, 28о–36о, 27.07.2023, 16.08.2023, 13.09.2023, 09 и 27.10.2023) вдоль русла рук. Нижняя Преголя (протока Старая Преголя, где находится водозабор). На точках выполнялись вертикальные зондирования зондом “Idronaut Ocean Seven 316Plus Multiparameter Probe”.

Величина солености определялась по инструментально измеряемым зондом значениям электропроводности и температуры. Из-за вариаций солености воды в речном потоке, связанных с естественной пятнистостью [11, 31], измерения солености имеет смысл учитывать с точностью до десятых долей процента. При пересчете практической солености (psu, Practical Salinity Unit) в абсолютную (г/кг или ‰) с помощью Ocean Calculator ODV [37] разница в значениях составила до 0.03 psu (при максимальной солености 6 psu); т. е. количественно (при используемой точности записи до десятых долей) показания (‰) и (psu) совпадают. Далее в качестве основной единицы измерения солености будут использованы промилле (количество твердых минеральных растворенных веществ в 1 кг воды).

Из литературы известно несколько способов пересчета величин хлорности в величины солености. Во всех формулах ниже: S – соленость, ‰; Cl – концентрация хлоридов, ‰.

Способ определения солености по концентрации хлора [1, 19] позволяет определять значение с точностью до 0.01‰:

$$S\%o = 0.030 + 1.8050 Cl\%o. \quad (1)$$

Другой способ рекомендован в [25, 28]:

$$S\%o = 1.80655 Cl\%o. \quad (2)$$

Для акватории Балтийского моря, имеющей невысокую соленость, применяют формулу (3) с поправкой [14, 19, 34]:

$$S\%o = 0.115 + 1.805 Cl\%o. \quad (3)$$

Для солоноватых вод устья р. Преголи применимость формулы (3) неочевидна, так как по своему солевому составу морская и речная вода различны: в морской воде с соленостью $>3\%o$ преобладают ионы хлора, а в устьях рек с соленостью $1-3\%o$ и менее солевой состав меняется на противоположный с преобладанием карбонатов (гидрохимический барьер в [2, 18, 21]).

Также может быть применена формула (4), применявшаяся ранее для р. Волги и р. Урал [18] и для распресненных районов Каспийского моря [21]:

$$S\%o = 0.14 + 2.36 Cl\%o. \quad (4)$$

Для сопоставления величин солености, полученных ГПКО “Водоканал” химическими методами, и величин, измеренных мультипараметрическим зондом Idronaut Ocean Seven, были применены расчетные методы (1)–(4), а также построена регрессионная зависимость (5).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Прямое сравнение показаний зонда и результатов аналитического определения солености

Для сопоставления значений солености, полученных расчетным способом из хлоридов, с инструментально измеренными зондом “Idronaut Ocean Seven” был проведен 3.02.2024 совместный с ГПКО “Водоканал” анализ одной и той же пробы воды (табл. 1).

Сотрудники ГПКО “Водоканал” выполнили отбор пробы из трубы, по которой вода из реки подается на станцию. Далее часть пробы без консервации была отправлена для лабораторного гидрохимического анализа, а другая часть была залита в пятилитровую пластиковую тару, куда был помещен зонд “Idronaut Ocean Seven”.

Сопоставление значений (табл. 2) выделило формулу (4) как наиболее подходящую для диапазона малых величин хлоридов, в то время как

Таблица 1. Значение хлорности пробы $Cl_{исх}$, полученное на ЮВС-2, результаты расчета ее солености S по формулам (1)–(4) и по измерению зондом Idronaut Ocean Seven (полу жирный шрифт – инструментальное измерение пробы)

Дата	ЮВС-2 Рыбное (дополнительные измерения)					Idronaut, ст. 34о
	$Cl_{исх}, \%o$	$S(1), \%o$	$S(2), \%o$	$S(3), \%o$	$S(4), \%o$	
13.02.2024	0.018	0.1	0.03	0.15	0.2	$S_{idr}, \%o$ 0.2

Таблица 2. Значения солености, измеренные зондом “Idronaut Ocean Seven” в русле Старой Преголи возле ЮВС-2 (ст. 34о), в сравнении с данными, рассчитанными по формулам (1)–(4) из данных по хлорности на ЮВС-2 (подчеркнутый шрифт – измерения, наиболее близкие по значению к результатам зондовых измерений)

Дата	Время	Idronaut, ст. 34о	ЮВС-2 Рыбное				
			$S, \%o$	$Cl_{исх}, \%o$	$S(1), \%o$	$S(2), \%o$	$S(3), \%o$
30.06.2023	8:50	0.3	0.06	0.1	0.1	0.2	<u>0.3</u>
27.07.2023	12:09	0.4	0.08	0.2	0.2	<u>0.3</u>	<u>0.3</u>
16.08.2023	12:11	0.6	0.24	0.5	0.4	<u>0.6</u>	0.7
13.09.2023	12:20	0.3	0.50	0.1	0.1	0.2	<u>0.3</u>
09.10.2023	13:19	4.4	2.44	<u>4.4</u>	<u>4.4</u>	<u>4.5</u>	5.9
16.10.2023	14:36	3.7	1.74	3.2	3.1	<u>3.3</u>	4.3
27.10.2023	10:50	0.5	0.21	0.4	0.4	<u>0.5</u>	0.6
27.12.2023	11:40	0.3	0.06	0.1	0.1	0.2	<u>0.3</u>

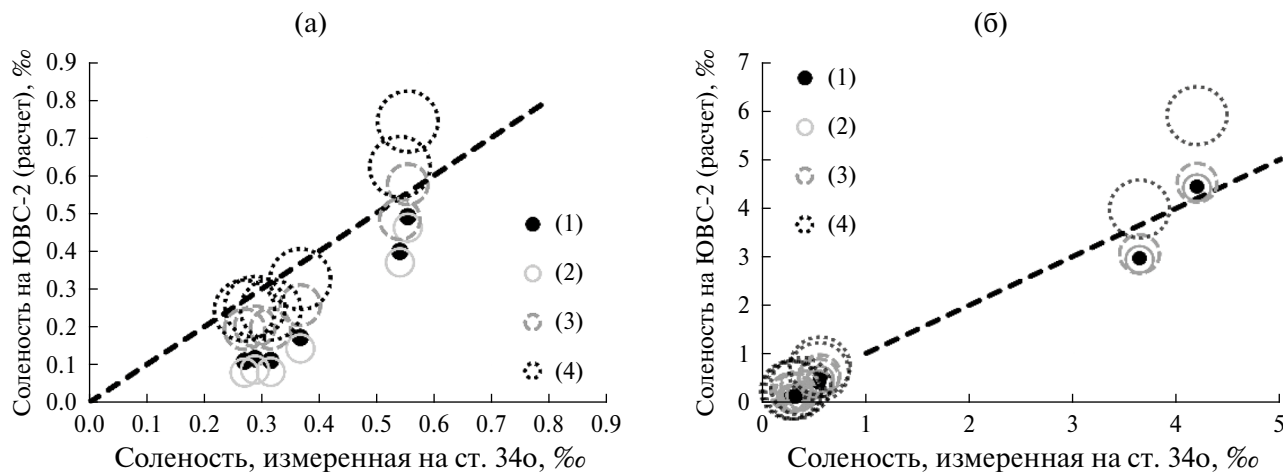


Рис. 2. Визуализация соотношения между значениями солёности, измеренными *in situ* на станции 340 и рассчитанными с помощью формул (1)–(4) по величине хлорности в пробах на ЮВС-2. На фрагментах указана главная диагональ, по отношению к которой проводится сопоставление измеренных и рассчитанных значений солёности.

результаты применения формул (1)–(3) показали заниженные значения (0.03–0.15‰). Если воспользоваться формулой (4) для пересчета ПДК (0.350‰), то получается, что величина ПДК составляет 1.0‰ или 1.0 рсу по показаниям зонда.

Сравнение значений солёности в реке и показаний на ЮВС-2

Значения солёности измерялись зондом “Idronaut Ocean Seven” на стрежне рук. Старая Преголя в точке 340 (рис. 1), расположенной напротив места забора воды для ЮВС-2. Конечно, некоторые расхождения значений солёности в реке и показаний на ЮВС-2 могут быть связаны с таким несовпадением точки отбора проб, но избежать этого невозможно, так как мониторинг в реке делается всегда на стрежне, а сотрудники водоканала проводят свои отборы вблизи берега, где стоит водозабор. Поэтому такая неопределенность всегда будет присутствовать в результатах.

Сравнение величин солёности по показаниям зонда “Idronaut Ocean Seven” для горизонта 1.5 м с данными на водозаборе ЮВС-2, приведенными к единицам солёности с помощью разных методик (формулы (1)–(4), табл. 2), показало, что разница в значениях варьируется от 0.003 до 0.38‰.

При концентрациях хлоридов в воде < 0.5‰ (т. е. при значениях солёности < 1.3‰) наиболее

близкие к измеренным зондом значениям получаются (рис. 2а) по формуле (4), а другие формулы дают результаты, заниженные на 0.1–0.2‰ (рис. 2). При пересчете значений в диапазоне хлорности > 0.5‰ (рис. 2а) наиболее близкие значения к тем, что измерены инструментально, дает формула (3), а при расчетах по формуле (4) получаются завышенные значения. С учетом разницы для разных диапазонов (рис. 2), в целом, можно сказать, что формула (3), рекомендованная для Балтики, является наиболее удачной для применения во всем диапазоне значений (0–6‰).

На основании имеющихся данных в добавлении к формулам (1)–(4) можно построить эмпирическую (рис. 3) пересчетную регрессионную зависимость (5) соответствия величин солёности ($S‰$), измеренных зондом “Idronaut Ocean Seven” на стрежне реки, и содержания хлоридов ($Cl_{исх}‰$) по данным анализа проб на водозаборной станции:

$$S‰ = 0.089 + 1.837 Cl_{исх}‰. \quad (5)$$

Эта зависимость позволяет в дальнейшем анализе перейти к сопоставлению значений, выраженных в промилле солёности, полученных инструментально в речном русле (ст. 340 напротив водозабора), с величинами хлорности (‰), полученных при прямом пробоотборе на водозаборной станции ЮВС-2. Водозабор осуществляется через трубопровод,

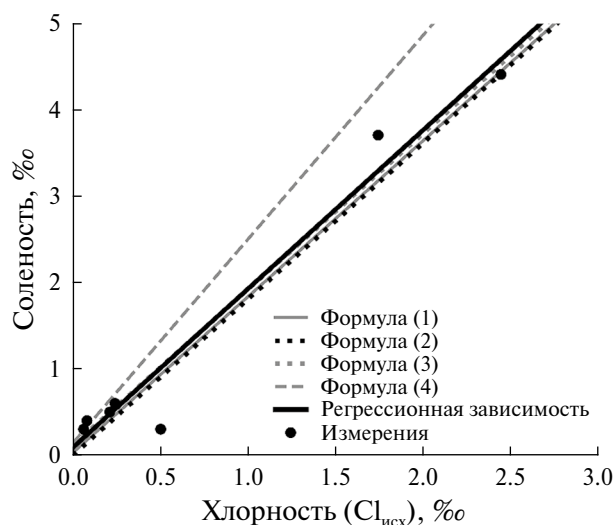


Рис. 3. Регрессионная зависимость между значениями солености, измеренными зондом “Idronaut Ocean Seven” на стрежне протоки Старая Преголя (ст. 34о), и значениями концентрации хлоридов, полученных при пробоотборе на ЮВС-2.

начало которого находится на глубине 1.5 м в русле реки. Отбор проб на хлориды проводится внутри станции ЮВС-2 на конце этого трубопровода.

Повторяемость событий перекрытия водозаборов

Согласно данным с ЮВС-2 [6], наибольшее количество периодов с превышением ПДК по хлорности на водозаборе (сопровождающееся перекрытием водозабора), как и наибольшая их продолжительность, были зарегистрированы в 2023 г. (июль 2023 — январь 2024 г.) (рис. 4). В 2020 и 2021 гг. количество случаев перекрытия водозабора было одинаковым, а их продол-



Рис. 4. Количество и суммарная продолжительность событий перекрытия водозаборов по годам с 2020 по 2023 г.

жительность — короткой (от < 1 до 3–5.5 сут). В 2022 г. более чем вдвое в сравнении с предыдущими годами увеличилось количество случаев перекрытия водозабора, а продолжительность — чуть более чем в 1.5 раза. В 2023 г. также наблюдалось увеличение — как в количестве случаев, так и в их продолжительности: количество случаев перекрытия водозабора увеличилось в 1.2 раза, а их суммарная за год продолжительность — гораздо сильнее — в 2.3 раза по сравнению с предыдущим годом.

В отличие от 2020 и 2021 гг., когда периоды с превышением ПДК по хлорности (или события перекрытия водозабора) отмечались только с сентября по ноябрь–декабрь, в 2022 и 2023 гг. случаи перекрытий пришлись и на летние месяцы — с августа и даже июля (рис. 5а, 5б). Одно измерение, превышающее ПДК по хлорности, было зафиксировано в январе 2024 г.

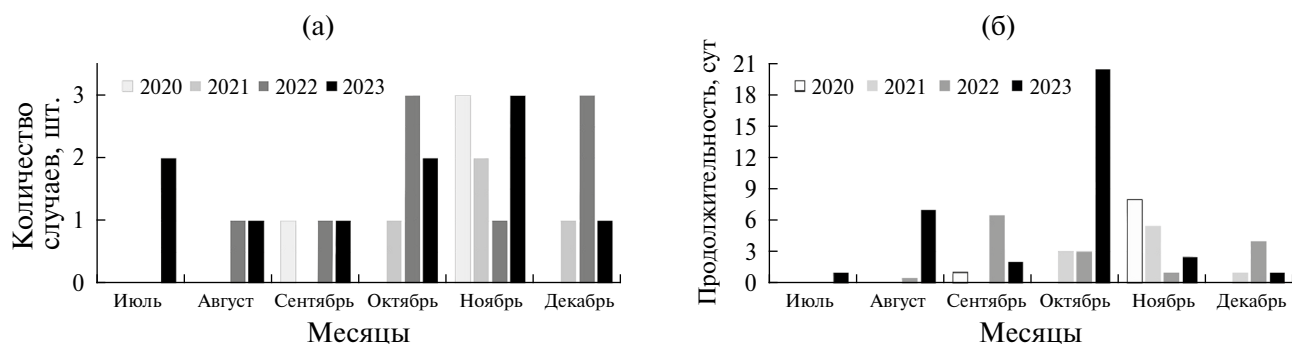


Рис. 5. Количество (а) и продолжительность (б) событий перекрытия водозабора суммарно по месяцам с 2020 по 2023 г.

По результатам наблюдений 2020–2023 гг. на ЮВС-2 заметна тенденция увеличения продолжительности периода, когда солоноватая вода, двигаясь вверх по реке, достигает водопроводной станции и становится причиной остановки водозабора.

Гидрометеорологические условия накануне и во время перекрытий водозабора

Во время события остановки водозабора в августе 2023 г. насосы водопроводной станции отключали 07.08.2023 в 15:00 (при концентрации хлоридов 0.350‰), а включили ровно через 7 сут – 14.08.2023 в 15:00 (при концентрации хлоридов 0.330‰). В октябре 2023 г. водозабор перекрывался два раза: первый – с 30.09.2023 по 02.10.2023 (2 сут), второй – с 03.10.2023 23:00 по 24.10.2023 12:00 (20.5 сут), после чего значения хлоридов держались близкими к ПДК еще 18 ч, а начали снижаться только 25.10.2023 в 06:00. Эти события отмечены теневой заливкой на рис. 6а, 6б.

В августе 2023 г. события развивались следующим образом. За 10 дней до отключения насосов

водозабора (27.07.2023) речная граница устьевой зоны смешения (изогалина 1‰) находилась в 3–4 км от ЮВС-2 ниже по течению (между станциями 30о–31о, рис. 7). По данным метеостанции Калининград (порт), 05–06 августа 2023 г. установился северо-восточный ветер, в результате чего уровень опустился до минимальных отметок (20–25 см) (рис. 6д), что наверняка определило опускание изогалины 1‰ еще ниже по течению. Затем, после непродолжительного штиля, установился юго-западный ветер и, усиливаясь, действовал в течение 13 ч вплоть до момента перекрытия водозабора (07 августа 2023 г. в 15:00). К этому моменту уровень успел возрасти до 60 см (рис. 6д).

Максимальная скорость ветра (средняя 12 м/с, порывы до 19 м/с) (рис. 6в) была зафиксирована 08.08.2023 в 02:00 одновременно с максимальным уровнем воды (1.02 м) (рис. 6д). Согласно утренним ежесуточным измерениям (рис. 6а), значение хлорности на ЮВС-2 составило в этот день 1.350‰ (т. е. 2.6‰ в единицах солености), но, по данным временно вве-

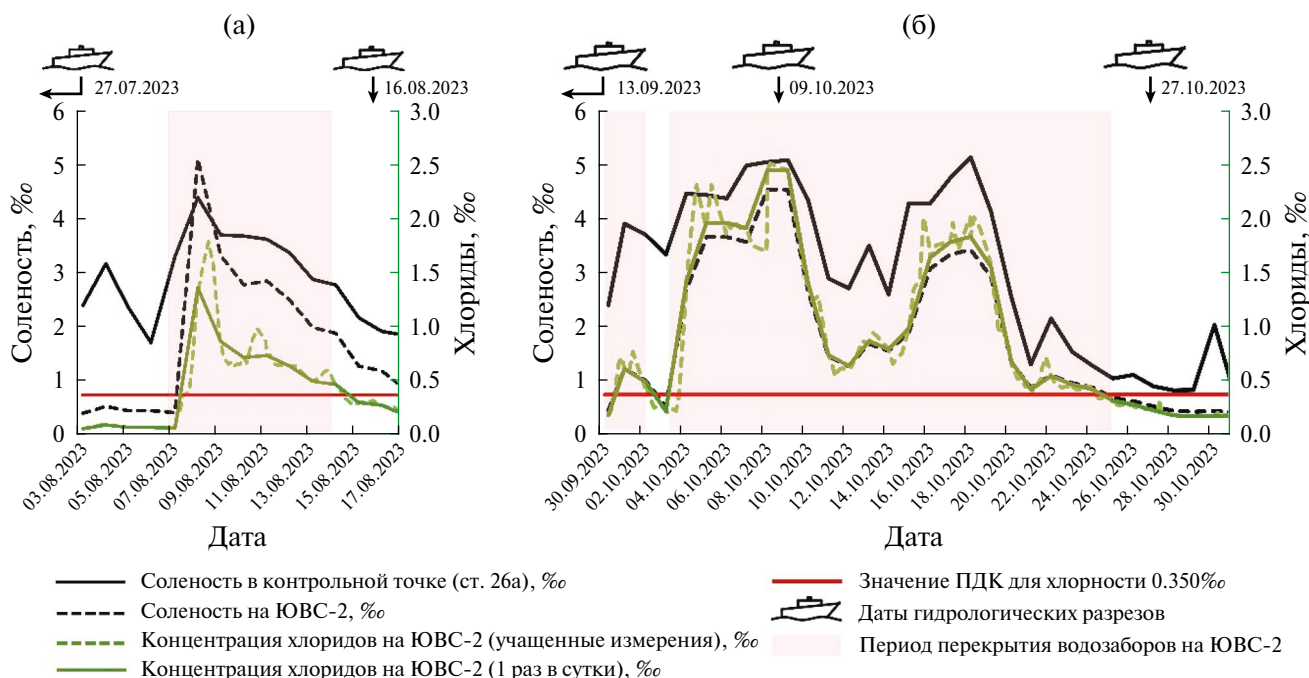


Рис. 6. Изменения по времени гидрологических характеристик в периоды отключения водозабора в августе и октябре 2023 г.: а, б – соленость на горизонте 1.5 м в контрольной точке (26а) и концентрация хлоридов на водозаборе ЮВС-2 (шкалы солености и хлорности не связаны). (Окончание на след. стр.)

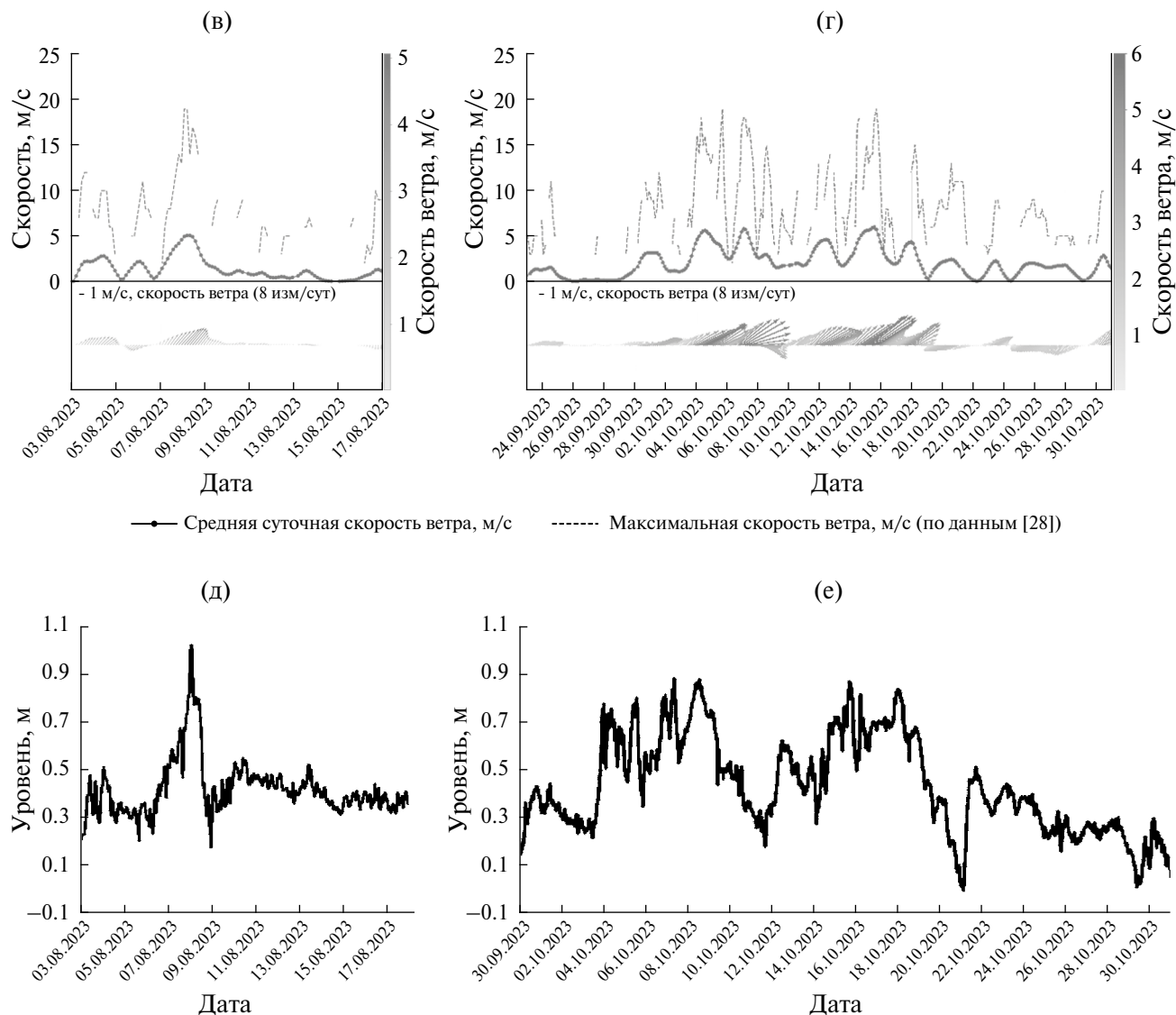


Рис. 6 (окончание). в, г – характеристики ветра в г. Калининграде по данным [27] (графики – средняя и максимальная скорость, стрелочки – векторы ветра, тон стрелочек – сила ветра); д, е – уровень воды в рук. Нижняя Преголя по данным гидропоста Калининград – Рыбный порт.

денного режима учащенных измерений (через каждые 3–6 ч), максимальное значение хлорности составило 1.80‰, что равно значениям солености 3.4‰, и оно было зафиксировано только через 12 ч после максимального подъема уровня. Такой учащенный режим нерегулярных измерений устанавливается на непродолжительное время, поэтому приведенный в статье анализ учитывает эти измерения при оценке только максимальных значений концентрации хлоридов, а в остальном базируется на данных регулярных ежесуточных утренних измерений на ЮВС-2, время которых фактически совпада-

ет с временем проведения зондирований в контрольной точке (26а).

В оставшуюся часть периода сохранились штилевые условия (изредка скорость ветра достигала 1–4 м/с), концентрация хлоридов монотонно снижалась (рис. 6б) и опустилась ниже ПДК только через 6 сут (14.08.2023), близко к фоновым (0.080‰) она приблизилась через 13 сут (21.08.2023).

Через два дня после восстановления водозабора – 16.08.2023 – верхняя граница изогали-

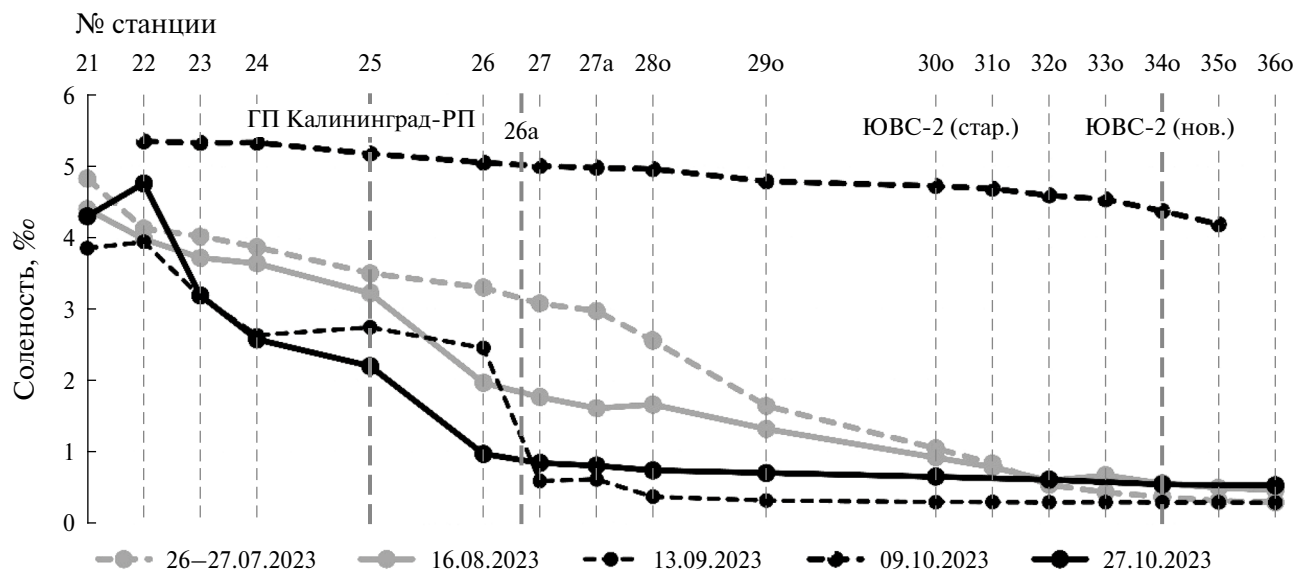


Рис. 7. Горизонтальный профиль солёности на глубине 1.5 м вдоль русла реки Нижняя Преголя от устья (т. 21) до водозабора ЮВС-2 (т. 360) для 27 июля, 16 августа, 13 сентября, 09 и 27 октября 2023 г.

ны 1‰ (ПДК) находилась на 3–4 км ниже по течению реки от ЮВС-2 фактически на станции 30о (рис. 7). Это означает, что за двое суток солёностный клин в условиях 1.5-суточного штиля (13.08.2023, 23:00 – 15.08.2023, 11:00) и изменения ветра на северо-восточные румбы (15.08.2023, 23:00 – 18.08.2023, 23:00) вернулся в исходное положение.

После августовского пика уровень воды в реке постепенно снижался до минимального значения (–14 см 20.09.2023), затем опять начал монотонно расти к октябрю 2023 г. Этот рост сопровождался поступлением солёноватых вод, что привело к перекрытию водозабора.

Продолжительность первого периода перекрытия водозабора в октябре (30.09.2023–02.10.2023) составила всего 2 сут. Накануне этого события (измерения 13.09.2023) (рис. 7) речная граница солёностного клина (изогалина 1‰) находилась существенно дальше от ЮВС-2 по сравнению с данными августа – она располагалась в 14.5 км от ЮВС-2 ниже по течению (точка 27). 24.09.2023, т. е. за 6 сут до перекрытия водозабора, установился штиль с редкими проявлениями слабого ветра (до 5 м/с) разных направлений. Примерно за сутки до отключения насосов ЮВС-2 ветер начал усиливаться, а последние 11 ч перед перекрытием скорость ветра (запад-

ное направление с переходом на ЮЮЗ) росла. За день уровень поднялся на 32 см с минимальных значений этого периода (11 см) до максимальных (43 см) (рис. 6е).

Максимальные скорости ветра были зафиксированы 30.09.2023 в 17:00 (средние скорости до 4 м/с, порывы до 11 м/с) и 01.10.2023 в 14:00 (средние скорости до 5 м/с и порывы до 12 м/с) (рис. 6г), локальные экстремумы уровня – 30.09.2023 в 20:00 (43 см) и 01.10.2023 в 11:00 (44 см) соответственно (рис. 6е).

Изменения хлорности на ЮВС-2 также имеют два небольших скачка: первый – через 10 ч после максимальной активности ветра ($Cl_{max} = 0.70‰$ или $S_{max} = 1.4‰$), второй ($Cl_{max} = 0.750‰$ или $S_{max} = 1.5‰$) был зафиксирован через 2 ч после первого.

Действие менее сильного ветра, чем в августе (средние скорости до 5 м/с, порывы до 12 м/с), спровоцировало небольшой скачок уровня (всего на 32 см) (рис. 6е) и кратковременное повышение концентрации хлоридов на ЮВС-2 (2 сут) (рис. 6б) с быстрым (1 сут) возвращением к значениям < ПДК.

Второй период перекрытия водозабора в октябре 2023 г. (с 3 по 24 октября) начался с усиления

ветра южных румбов за 12 ч до момента отключения водозабора (03.10.2023 в 23:00). За это время (12 ч) уровень возрос на 53 см до отметки 75 см (рис. 6е). Почти весь период в целом сопровождался продолжительным действием ветра западных румбов (03.10.2023–19.10.2023), усиливающимся примерно на сутки (средняя скорость достигала 11 м/с, порывы до 10–19 м/с) с периодичностью 2–3 дня. В конце периода (19.10.2023–21.10.2023) было отмечено действие северо-восточных румбов. За периоды ветрового затишья (2–3 дня) уровень воды в реке успел лишь единожды вернуться к исходным значениям (~20 см), а в основном с небольшими колебаниями держался между отметками 50–90 см.

Максимальные значения хлорности за весь продолжительный период перекрытия водозабора были зафиксированы 04, 05, 08, 15, 17 и 18 октября 2023 г.

Первое максимальное значение концентрации хлоридов ($Cl_{\max} = 2.3\text{‰}$, $S_{\max} = 4.3\text{‰}$, рис. 6б) было зафиксировано 04.10.2023 в 19:00 (рис. 6б) – менее чем через сутки после перекрытия водозабора. На 11 ч раньше ему предшествовала максимальная скорость ветра (средние значения до 8 м/с, порывы до 18 м/с) и на 10 ч раньше – максимальное значение уровня воды (75 см) (рис. 6е). Это значение характеризует начало периода поддержания повышенной хлорности (04.10.2023–09.10.2023).

Наибольшее значение хлорности ($Cl_{\max} = 2.5\text{‰}$ или $S_{\max} = 4.7\text{‰}$) (рис. 6б) за второй октябрьский период перекрытия водозабора было зафиксировано 08.10.2023 в 10:00. Исходя из гидрометеорообстановки на эту дату, можно предположить, что истинный экстремум хлорности не был зафиксирован измерениями, так как в течение почти суток после предыдущего измерения натурные данные отсутствуют. Предполагаемый максимум ($Cl_{\max} > 2.5\text{‰}$ или $S_{\max} > 4.7\text{‰}$) (рис. 6б) должен приходиться на 09.10.2023 в 01:00–03:00, т. е. через ~ 12 ч после действия максимальной скорости ветра (средней до 6 м/с, порывов до 15 м/с) и максимального уровня воды (88 см, рис. 6е) – оба события 08.10.2023 в 14:00.

Затем, в течение 3 сут в условиях действия более слабых ветров (средние скорости до 6 м/с,

порывы до 10 м/с) юго-западных румбов, а также периодического штиля происходило быстрое уменьшение хлоридов на ЮВС-2. Минимум ($Cl_{\min} = 0.520\text{‰}$ или $S_{\min} = 4.7\text{‰}$) (рис. 6б) пришелся на 11.10.2023 в 17:00, одновременно с низким уровнем воды (18 см) (рис. 6е), но он не был ниже ПДК и водозабор не восстанавливался.

Следующий период, когда в реке возле ЮВС-2 с небольшими колебаниями удерживались высокие значения хлорности (1.6–2.0‰), продолжался с 15.10.2023 по 18.10.2023. Принадлежащий ему первый максимум $Cl_{\max} = 2.0\text{‰}$ или $S_{\max} = 3.8\text{‰}$ (15.10.2023 в 23:30) (рис. 6б) был вызван юго-западным ветром, не стихающим в течение двух предыдущих суток. Экстремумы, согласно гидрометеоданным, наблюдались: средняя скорость ветра до 11 м/с (максимальная – до 18 м/с) – за 10 ч до момента наступления первого максимума, уровень воды (87 см) (рис. 6е) – за 7 ч.

Последний максимум этого периода характеризовался такими же значениями хлорности, как в дату 15.10.2023, но более слабой предшествующей ветровой обстановкой (средняя скорость до 8 м/с, максимальная – до 15 м/с) и меньшей отметкой уровня (84 см). Для нагона воды к ЮВС-2 с тем же содержанием хлоридов, но в условиях меньших скоростей ветра, потребовалось больше времени: реакция на экстремум ветра проявилась в значениях хлорности через 12 ч, а на значениях уровня – 10 ч.

Восстановление речного режима после максимума 15.10.2023 происходило в течение 7 сут в два этапа: быстрый (с 18.10.2023 по 19.10.2023–20.10.2023), когда значения хлорности уменьшались со скоростью 0.9‰/сут до значений 0.5‰ (рис. 6б) под влиянием сильных северо-восточных ветров, и медленный (с 20.10.2023 по 25.10.2023) – под влиянием штиля и со скоростью понижения концентрации 0.1‰/сут вплоть до уровня ПДК.

Во время обследования 27.10.2024 речная граница соленостного клина была зафиксирована на уровне станции 25 (в 14.5 км ниже по течению от ЮВС-2, рис. 7), т. е. через два дня после восстановления речного режима возле ЮВС-2 и открытия водозабора.

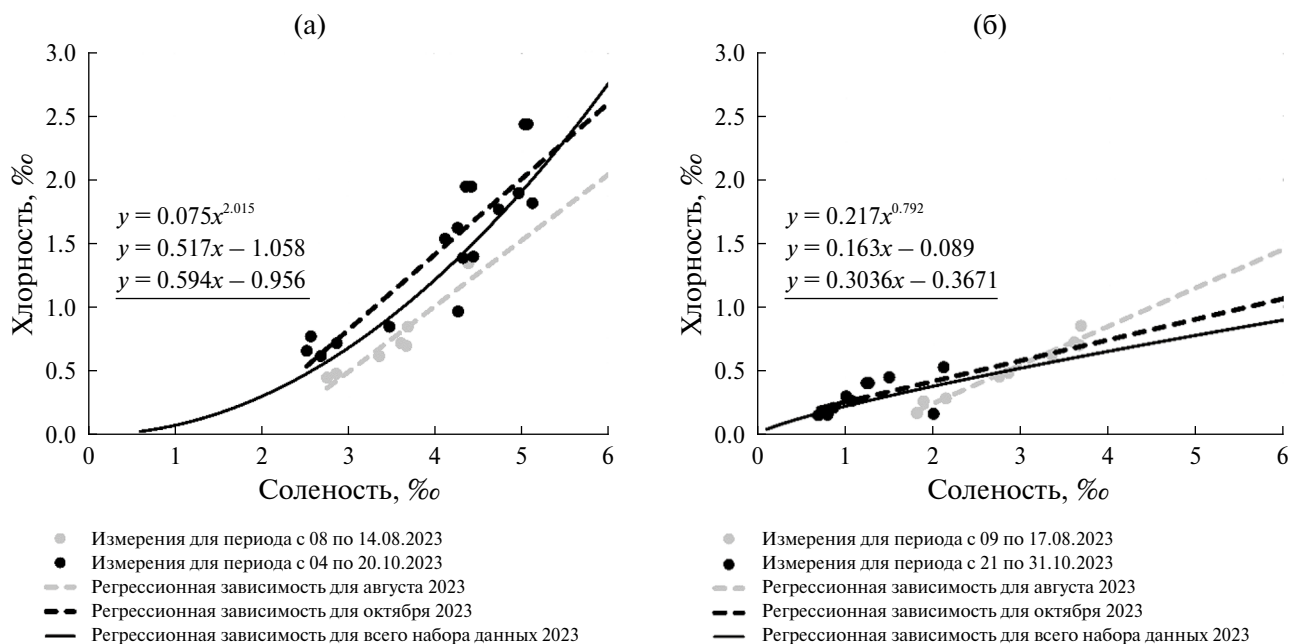


Рис. 8. Регрессионная зависимость между значениями солености, измеренными на контрольной точке (26а) на глубине 1.5 м, и значениями концентрации хлоридов, полученных при пробоотборе на ЮВС-2 с частотой измерений 1 раз/сут для периодов перекрытия водозаборов (а) и для периодов восстановления речного режима (б).

В октябре гораздо более продолжительный, чем в августе, период действия ветра спровоцировал более сильное (на 0.8‰) проникновение солоноватых вод – величина хлоридов на водозаборе ($Cl_{исх}$) достигла 2.5‰. Во всех трех случаях перекрытия водозабора концентрация хлоридов на ЮВС-2 начала увеличиваться через 10–13 ч после начала действия ветра юго-западных румбов, фиксирующихся на метеостанции Калининград (порт). Но разница в продолжительности сильного ветра (2 дня в августе и 20 дней с периодическими затишьями в октябре) являлась решающим фактором для продолжительности периода проникновения солоноватых вод. Этапы восстановления речного режима в оба периода перекрытия водозабора были очень схожи, продолжительность составила 6–7 дней.

Связь между соленостью в контрольной точке и на водозаборе во время событий перекрытия водозаборов

Сопоставление изменений по времени солености в контрольной точке (26а) и хлоридов на водозаборе (рис. 6а, 6б) (‰) демонстрирует их синхронность (во время события нагона) на суточном масштабе времени. Коэффициен-

ты корреляции значений солености на глубине 1.5 м в контрольной точке, измеренной зондом “Itronaut Ocean Seven”, и хлорности на ЮВС-2, определенной в лаборатории, для августовского и октябрьского события достаточно высокие (0.82 и 87 соответственно).

Для августовского периода 03.08.2023–14.08.2023 (рис. 6а) разница между соленостью на глубине 1.5 м в контрольной точке (26а) и соленостью на водозаборе изменялась в пределах от 1.2 до 3.1‰ (в среднем разница составила 2.0‰ со стандартным отклонением 0.5‰). Для октябрьского периода 30.09.2023–31.10.2023 (рис. 6б) – изменения происходили в пределах от 0.3 до 2.9‰ (со средней разницей 1.2‰ и стандартным отклонением – 0.8‰). Эта разница обычно больше в начале периода распространения солоноватых вод и меньше в фазе его окончания.

Для августа и сентября 2023 г. были построены регрессионные зависимости (линейная и степенного вида) значений хлорности на ЮВС-2 от солености в контрольной точке: для периода роста хлорности (после превышения ПДК) и ее стабилизации на высоких значениях (рис. 8а, формулы

(6)–(8)), а также для периода восстановления речного режима, т. е. периода понижения солености в реке (рис. 8б) (формулы (9)–(11)):

$$y = 0.075x^{2.015}, \quad (6)$$

$$y = 0.517x - 1.058, \quad (7)$$

$$y = 0.594x - 0.956, \quad (8)$$

$$y = 0.217x^{0.792}, \quad (9)$$

$$y = 0.304x - 0.367, \quad (10)$$

$$y = 0.163x - 0.089, \quad (11)$$

где $y(\text{‰})$ – значения хлорности на ЮВС-2, $x(\text{‰})$ – значения солености в контрольной точке (26а).

Линейные зависимости (7) и (8) построены для августовского и октябрьского периодов соответственно, а нелинейная зависимость (6) – для всего набора данных по росту солености. Линейные зависимости (10) и (11) построены для августовского и октябрьского периодов соответственно, а нелинейная зависимость (9) – для всего набора данных по снижению солености.

Полученные регрессионные зависимости (6)–(11) в первом приближении позволяют оценивать значения хлорности возле ЮВС-2 по данным измерений солености в контрольной точке (26а). Они подразумевают под собой приближение “вмороженного” соленостного клина. Формулы (6)–(8) дают увеличение хлорности на водозаборе пропорционально увеличению солености на контрольной точке (при продвижении клина вверх по реке), а формулы (9)–(11), наоборот, падение солености на водозаборе при снижении солености в контрольной точке.

Работа по уточнению этих зависимостей должна продолжаться по мере накопления данных, так как в настоящий момент степенная регрессионная зависимость (6) и (9), выбранная из соображений, что нулевой солености в контрольной точке должна обязательно соответствовать нулевая соленость на водозаборе, диктует, что даже минимальное повышение солености в контрольной точке сопровождается

повышением хлорности на водозаборе ЮВС-2, что не соответствует действительности, так как соленостный клин, распространяясь вверх по реке, приносит соленую воду к водозаборам с некоторым опозданием. С этой точки зрения линейные регрессионные зависимости (7), (8), которые указывают, что хлорность на водозаборе начинает расти только после того, как соленость в контрольной точке превысит 1.5‰, более правдоподобны; т. е. именно с этого момента возрастает вероятность, что речная граница соленостного клина при своем продвижении вверх по реке может достигнуть водозаборов и хлориды там превысят ПДК.

Регрессионная зависимость фактически получена в рамках представлений о “вмороженном” соленостном клине, и поэтому она является только первым приближением к оценке реального поведения проникновения солоноватых вод. Но в этих рамках она может быть также использована для предсказания – насколько далеко при нагонных явлениях может продвинуться солоноватая вода из устьевой части реки (где находятся г. Калининград, портовые акватории, сбросы сточных вод) и принести с собой различные типы загрязняющих веществ, включая и частицы микропластика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для сопоставления величин хлорности, получаемых ГПКО “Водоканал” химическими методами (пробы из подающей трубы), и величин солености, измеренных мультипараметрическим зондом “Idronaut Ocean Seven 316Plus” на стрежне реки, наиболее подходящей формулой в диапазоне наблюдаемых величин хлорности 1–6‰ оказалась формула (3), предложенная для Балтийского моря [13, 19, 34].

По данным наблюдений на ЮВС-2 для 2020–2023 гг. (4 года), прослеживается тенденция увеличения количества и общегодовой продолжительности случаев перекрытия водозаборов в связи с продвижением соленостного клина вверх по реке, а также расширяется сезонное окно, в пределах которого происходят эти события.

На основе двух рассмотренных периодов (ав-

густ и октябрь 2023 г.) возрастания солености и перекрытия водозаборов можно отметить, что рост хлорности (солености) на ЮВС-2 до значений, превышающих ПДК, происходил менее чем за сутки. Значения > ПДК держались в течение 2–7 сут, но в экстремальных условиях октября 2023 г. ~20 сут (04.10.2023–24.10.2023). Восстановление речного режима (снижение солености от максимальных значений до ПДК) происходило за период до 7 сут.

Рассмотренные два периода глубокого проникновения клина солоноватых вод в августе и октябре 2023 г. показали, что продвижение соленостного клина вверх по реке вплоть до блокировки водозаборов возможно даже при не очень сильном ветре западных и юго-западных румбов (со средними и максимальными скоростями 3–5 и 7–10 м/с) продолжительностью 12–24 ч, но только при условиях одновременного резкого подъема уровня воды на 50–70 см за предшествующие 1–2 дня и, главное, исходного расположения клина достаточно близко к водозаборам. Оказалось, что при указанных условиях подъема уровня и ветра соленостный клин способен продвинуться на 3–14 км вверх по реке и достичь водозаборов.

Предложена регрессионная зависимость между величинами хлорности на ЮВС-2 и солености в середине устьевого участка р. Преголи (на глубине 1.5 м на контрольной точке 26а, территория Музея Мирового океана, г. Калининград), которая в первом приближении может быть использована для оценки значений хлорности на ЮВС-2 в случае проникновения солоноватых вод вверх по реке и, наоборот, в случае восстановления речного режима.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Калининградского управления Северо-Западного бассейнового филиала “Росморпорта”, оказавшим содействие при проведении работ, сотрудникам “Водоканала” и Калининградского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, оказавшим поддержку на этапе сбора натуральных данных, С.Н. Красильникову (АО ИО РАН) за помощь в проведении инструментальных измерений, а также анонимным рецензентам за внимательное прочтение руко-

писи и доброжелательные комментарии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Архипкин В.С., Добролюбов С.А.* Океанология: основы термодинамики морской воды: учебное пособие для вузов. М.: Юрайт, 2024. 155 с. ISBN 978-5-534-04358-7 // Образовательная платформа Юрайт. <https://urait.ru/bcode/539264> (дата обращения: 20.02.2024)
2. *Байдин С.С., Глуховский Б.Х., Ющак А.А., Костяницын М.Н.* Руководство по расчету элементов гидрологического режима в прибрежной зоне море и в устьях рек при инженерных изысканиях. М.: Московское отделение Гидрометеоздата, 1973. 537 с.
3. *Беликов В.В., Милитеев А.Н.* Численная модель морских нагонов в приустьевых участках рек // Сб. науч. тр. КаГУ. Калининград, 1993. С. 15–23.
4. *Великанов Н.Л., Наумов В.А., Маркова Л.В.* Изменчивость качества воды реки Преголя // Вода: химия и экология. 2016. № 8 (98). С. 82–88.
5. ГОСТ 27065-86. Качество вод: термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1988. С. 1–11.
6. ГПКО “Водоканал”. Государственное предприятие Калининградской области “Водоканал” (ГП КО “Водоканал”). <https://www.vk39.ru/o-vodokanale/vodosnabzhenie/> (дата обращения: 04.02.2024)
7. *Двоеглазова Н.В.* Возможное блокирование водозаборов г. Калининграда на реке Преголе интрузиями вод с повышенной соленостью // VII Всерос. науч. конф. молодых ученых “Комплексные исследования Мирового океана”. Сб. материалов конф. КИМО-2023. СПб., 2023. С. 430–432.
8. *Двоеглазова Н.В.* Краткопериодная изменчивость вертикальной термохалинной структуры вод реки Преголи в устьевой зоне // Географическое пространство: сбалансированное развитие природы и общества: Материалы III Международ. науч.-практ. конф. Челябинск: Край Ра, 2023. С. 90–96.
9. *Двоеглазова Н.В., Чубаренко Б.В.* Натурное изучение проникновения вод Калининградского залива вверх по реке Преголе (Юго-Восточная Балтика) // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. “Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития”. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2023. С. 252–255. ISBN 978-5-91155-218-3
10. *Двоеглазова Н.В., Чубаренко Б.В.* Изменения в структуре гидрологических характеристик устьевой зоны смешения реки Преголи (Юго-Восточная Балтика) в период осеннего осолонения // Гидрометеороло-

- гия и экология. 2024. № 74. С. 87–104. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2024-74-87-104>
11. Двоеглазова Н.В., Шушарин А.В. Учет эффекта естественной пятнистости гидрологических характеристик при изучении устьевой зоны смешения реки Преголи (Юго-Восточная Балтика) // Береговая зона морей России в XXI веке // Тез. докл. XXX всерос. конф. М.: Геогр. фак. МГУ, 2024. С. 30–33. ISBN: 978-5-89575-269-2
 12. 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 // Естествен. техн. науки. 2013. № 6. С. 206–211.
 13. 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 // Изв. КГТУ. 2014. № 35. С. 11–20.
 14. Жуков Л.А. Общая океанология / Под ред. Ю.П. Доронина. Л.: Гидрометиздат, 1976. 376 с.
 15. Зырянов В.Н., Чебанова М.К., Филатов Н.Н. Интрузия морских вод в устья рек // Вод. ресурсы. 2015. Т. 42. № 5. С. 492. <https://doi.org/10.7868/S032105961505020X>
 16. Маркова Л.В. Анализ Качества воды на Южной водопроводной станции города Калининграда // Вестн. молодежной науки. 2016. № 5 (7). 7 с.
 17. Маркова Л.В., Наумов В.А. Качество воды, поступающей из реки Преголи на Южную водопроводную станцию города Калининграда // Водохозяйственные проблемы региона. Сб. науч. тр. / Отв. ред. В.А. Наумов. Калининград: Калининградский гос. техн. ун-т, 2016. С. 60–67.
 18. Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек. М.: Изд-во МГУ, 1998. 176 с.
 19. Михайлов В.Н., Добролюбов С.А. Гидрология: учебник для вузов. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2017. 752 с.
 20. Михайлов В.Н., Косарев А.Н., Повалишников Е.С., Савенко В.С. Процессы смешения речных и морских вод в устьевых областях рек // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5, География. 1997. № 5. С. 15–21.
 21. Михайлов В.Н., Михайлова М.В., Магрицкий Д.В. Основы гидрологии устьев рек. Уч. пособие. М.: РИУМФ, 2018. 314 с. ISBN 978-5-89392-818-1
 22. Михайлова М.В. Особенности гидрологических процессов в арктическом устье реки (на примере р. Колвилл, Аляска, США) // Вод. ресурсы. 2009. Т. 36. № 1. С. 29–45.
 23. Михайлова М.В. Процессы проникновения морских вод в устья рек // Вод. ресурсы. 2013. Т. 40. № 5. С. 483–498. <https://doi.org/10.7868/S0321059613050052>
 24. Михайлова М.В., Белотти П., Валери П., Тортора П. Проникновение морских вод на устьевой участок Тибра // Вод. ресурсы. 1999. Т. 26. № 6. С. 757–764.
 25. Океанографические таблицы. Л.: Гидрометиздат, 1975. 477 с.
 26. Повалишников Е.Д. Причины проникновения морских вод в реки и его экологические последствия // Вестн. Московского ун-та. 2001. 5 (3). С. 20–28. EDN: XSSXGL
 27. “Расписание погоды”. Лицензированная гидрометеорологическая кампания. <http://www.rp5.ru> (дата обращения: 09.09.2023)
 28. РД 52.10.243-92 Руководство по химическому анализу морских вод. СПб.: Росгидромет, 1992. 265 с.
 29. СанПиН 1.2.3685-21 Постановление об утверждении санитарных правил и норм “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”. М., 2021. С. 1–469.
 30. 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 (проект программы “Исследование природы Мирового океана” федеральной целевой программы “Мировой океан”). Вып. 2. Апатиты: Кольский НЦ РАН, 2007. С. 591–602.
 31. Чубаренко Б.В., Двоеглазова Н.В., Боскачев 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. № 52 (1). С. 157–176. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(1\).8](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(1).8)
 32. 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.
 33. 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). 2001. № 7. С. 80–88.
 34. Шамраев А.В., Шишкина Л.А. Океанология. Учебник для гидрометеорол. техникумов / Под ред. А.В. Не-

- красова, И.П. Карповой. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 382 с.
35. Boskachev R.V., Chubarenko B.V. Bottom Intrusions of Brackish Water from the Vistula Lagoon into the Downstream Pregolya Branch // *Water Resour.* 2025. V. 52. № 1. P. 102–116.
36. Chubarenko B., Domnin D., Navrotskaya S., Stont Zh., Chechko V., Bobykina V., Pilipchuk V., Karmanov K., Domnina A., Bukanova T., Topchaya V., Kileso A. Transbound-ary Lagoons of the Baltic Sea // *The Diversity of Russian Estuaries and Lagoons Exposed to Human Influence* / Ed. R. Kosyan. Switzerland: Springer Verlag, 2017. P. 149–191. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43392-9_6
37. IOC, SCOR and IAPSO, 2010. The international thermodynamic equation of seawater – 2010. Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No. 56, UNESCO (English). 196 p.

The saltwedge intrusion in the Pregolya River as a reason for blocking the water intakes of Kaliningrad City

N. V. Dvoeglazova*, B. V. Chubarenko

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

**e-mail: nadya2eyes@mail.ru*

Intense wind surges redistribute the waters of the Pregolya River mouth and impede the operation of the water intake for the needs of Kaliningrad. The inability to withdraw water during long-term (more than 10–20 days) brackish water penetration can create problems with water supply. Data (2020–2024) on water supply shutdowns at the water supply station (reflected the intensity of brackish water wedge penetration upriver) showed an interannual increase in the number and duration of such cases. A comparison was made of the salinity measurements at a control point in the middle of the river mouth section with the chlorine data at the water intake. The considered examples of water supply shutdowns for 7–20 days in August and October 2023 made it possible to assess the conditions (wind exposure, water level rise and the initial position of the salinity wedge), which all facilitating the movement of wedge up to the water intake point. A regression relationship is proposed between the values of chlorinity at the water intake and salinity in the middle of the estuary of the Pregolya River, which, as a first approximation, can be used to estimate the values of chlorinity at the water intake in the case of penetration of brackish water.

Keywords: estuaries, estuarine mixing zone, wind surges, saltwedge, brackish water intrusions, field data, water supply, South-Eastern Baltic.