

Водные биоресурсы и среда обитания
2024, том 7, номер 4, с. 7–21
<http://journal.azniirkh.ru>, www.azniirkh.ru
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online



Aquatic Bioresources & Environment
2024, vol. 7, no. 4, pp. 7–21
<http://journal.azniirkh.ru>, www.azniirkh.ru
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online

Экологические проблемы и состояние водной среды

УДК 504.054

https://doi.org/10.47921/2619-1024_2024_7_4_7

EDN: PGPLKL



Для цитирования: Бердников С.В., Герасюк В.С., Клещенков А.В., Кулыгин В.В., Лихтанская Н.В., Шевердяев И.В. Оценки влияния нагонных явлений на потенциал накопления соединений тяжелых металлов в почве дельты Дона в период маловодья (2007–2020 гг.). *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2024. Т. 7, № 4: 7–21. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2024_7_4_7.

For citation: Berdnikov S.V., Gerasyuk V.S., Kleshchenkov A.V., Kulygin V.V., Likhtanskaya N.V., Sheverdyayev I.V. Estimates of the surge phenomena effects on the potential for heavy metal compounds accumulation in the Don Delta soil during the low water period (2007–2020). *Aquatic Bioresources & Environment*. 2024. Vol. 7, no. 4: 7–21. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2024_7_4_7. (In Russian).

ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НАГОННЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ПОТЕНЦИАЛ НАКОПЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВЕ ДЕЛЬТЫ ДОНА В ПЕРИОД МАЛОВОДЬЯ (2007–2020 ГГ.)

**С. В. Бердников*, В. С. Герасюк, А. В. Клещенков,
В. В. Кулыгин, Н. В. Лихтанская, И. В. Шевердяев**

Южный научный центр Российской академии наук (ЮНЦ РАН), Ростов-на-Дону 344006, Россия

*E-mail: berdnikovsv@yandex.ru

Аннотация

Введение. Загрязнение почвы поймы нижнего Дона потенциально токсичными элементами (ПТЭ), к которым относятся соединения тяжелых металлов (ТМ), связано с привнесением этих веществ речными водами в периоды половодий, когда дельта затопливается паводковыми водами и на ее территории накапливаются взвешенные наносы и мигрирующие в их составе различные химические соединения. В современный длительный период маловодья весенние паводки отсутствуют, а затопление происходит преимущественно нагонными морскими водами из Таганрогского залива. **Актуальность.** Комплексный подход на основе данных экспедиционных исследований, наблюдений на гидрологических постах и результатов математического моделирования позволяет показать, как ПТЭ, мигрирующие в составе взвешенных наносов, могут загрязнять почвы дельты Дона и как это связано с нагонными явлениями. **Целью** настоящей работы является описание условий загрязнения дельты Дона ПТЭ, прежде всего соединениями ТМ, в условиях низкого жидкого и сокращения твердого стоков р. Дон и влияния нагонных явлений.

Методы. Для описания переноса и трансформации взвешенных веществ использован подход, базирующийся на совместном применении детальной гидрологической модели HEC-RAS, адаптированной к условиям устьевой области р. Дон (DonDeltaHECRAS), и динамической модели баланса воды и веществ, переносимых водными массами (DonDeltaBalanceModel).

Результаты. Получены оценки поступления ТМ со стоком в устьевую область Дона и ее вклада в «фильтрацию» химических соединений на пути их миграции с речными водами в Азовское море. Проведены расчеты динамики взвешенных наносов для шести типов нагонов, получены оценки накопления взвешенных веществ в дельте Дона. Также получены оценки поступления ТМ в верхний слой почвы дельты Дона при нагонах. **Выводы.** Источником загрязнения дельты ПТЭ является их антропогенный сток. Если в период высокой воды и паводков накопление ПТЭ происходит за счет речного фактора, то в период маловодья и влияния нагонов антропогенные речные ПТЭ, после биогеохимической трансформации на устьевом взморье, в Таганрогском заливе и Азовском море, возвращаются в дельту при нагонах. Роль дельты и устьевой области в качестве «фильтра» на пути миграции растворенных и взвешенных форм ПТЭ из реки в море трансформировалась.

Ключевые слова: тяжелые металлы, дельта Дона, маловодье, нагонные явления, антропогенное воздействие

ESTIMATES OF THE SURGE PHENOMENA EFFECTS ON THE POTENTIAL FOR HEAVY METAL COMPOUNDS ACCUMULATION IN THE DON DELTA SOIL DURING THE LOW WATER PERIOD (2007–2020)

S. V. Berdnikov*, V. S. Gerasyuk, A. V. Kleshchenkov,
V. V. Kulygin, N. V. Likhtanskaya, I. V. Sheverdyayev

Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (SSC RAS), Rostov-on-Don 344006, Russia

**E-mail: berdnikovsv@yandex.ru*

Abstract

Background. The contamination of the Lower Don floodplain soil by potentially toxic elements (PTE), which include heavy metal (HM) compounds, is associated with the introduction of these substances with river water during high water periods, when the delta is flooded by flood water and suspended sediments and various chemical compounds migrating within them accumulate on its territory. During the current prolonged period of low water, spring floods are absent, and flooding occurs mainly by surge sea water from Taganrog Bay. **Relevance.** A multidisciplinary approach based on the data collected during field studies and observations conducted at hydrological stations, as well as on the results of mathematical modeling makes it possible to reveal how PTEs migrating as part of suspended sediments can contaminate the Don Delta soils and how this is related to surge phenomena. The *aim* of this work is to describe the conditions of the Don Delta pollution with PTEs, primarily HM compounds, in the context of low water and decreasing solid runoff of the Don River and the surge phenomena influence. **Methods.** To describe the transport and transformation of suspended solids, we used an approach based on the joint application of the detailed hydrological model HEC-RAS adapted to the conditions of the Don River estuary (DonDeltaHECRAS) and the dynamic model of the balance of water and substances transported by water masses (DonDeltaBalanceModel). **Results.** Estimates of HM introduction with runoff to the Don River estuary and its contribution to the “filtration” of chemical compounds on the paths of their migration with river water to the Azov Sea have been obtained. Calculations of suspended sediment dynamics for six types of surges have been carried out, and estimates of suspended sediment accumulation in the Don Delta have been obtained. Estimates of HM input into the upper soil layer of the Don Delta during surges have also been obtained. **Conclusion.** The source of pollution of the delta with PTEs is their anthropogenic runoff. While during high water and floods the accumulation of PTEs occurs due to the river contribution, during low water and surges, anthropogenic riverine PTEs, after their biogeochemical transformation on the estuarial seashore, in Taganrog Bay, and the Azov Sea, return to the delta via surges. The role of the delta and the estuary as a “filter” on the migration path of dissolved and suspended forms of PTEs from the river to the sea has been transformed.

Keywords: heavy metals, Don Delta, low water, surge phenomena, anthropogenic impact

ВВЕДЕНИЕ

Для дельты Дона и близлежащих к ней территорий характерно сочетание природных, сельскохозяйственных и городских ландшафтов. Благодаря природному парку «Донской», который был открыт в 2015 г., в дельте выполняются мероприятия, направленные на сохранение биоразнообразия. Хотя экономическая деятельность, связанная с изменением землепользования, в парке в целом запрещена, разрабатываются планы расширения рекреационной привлекательности дельты Дона. Например, ГБУ РО «Дирекция особо охраняемых природных территорий областного значения» разработан туристический маршрут «Тайны дельты Дона» протяженностью 28 км [1].

Как и в случае многих других крупных дельт мира, рост городского населения является важным фактором, влияющим на управление дельтами. В период с 1959 по 2010 г. население увеличилось с 0,9 до 1,5 млн чел. Значительный рост населения произошел в Ростове-на-Дону (с 600 тыс. жителей до 1,09 млн), Батайске (с 65 до 111 тыс. жителей) и Азове (с 59 до 83 тыс. жителей) [2]. В Ростове-на-Дону в 2010 г. на окраине дельты был создан новый жилой район Левенцовка с планируемым населением 86 тыс. жителей. Таким образом, Ростов-на-Дону в настоящее время расширяет свою площадь в направлении дельты.

Ранее было показано, что почвы поймы нижнего Дона значительно загрязнены потенциально токсичными элементами (ПТЭ), к которым относятся соединения тяжелых металлов [3–6]. Хотя при оценке экологических рисков и рисков для здоровья населения отмечено, что наблюдаемые уровни содержания ПТЭ в почвах характеризуются низким совокупным экологическим риском [7], были обнаружены значительные морфологические и функциональные нарушения у одного вида рогоза *Typha australis* Schum. и Thonn., произрастающего в прибрежной зоне морского края дельты, при том, что другой вид *Typha laxmannii* Leresch. демонстрировал высокий уровень адаптации к длительному техногенному воздействию ПТЭ [5].

Загрязнение пойменных участков дельты Дона соединениями тяжелых металлов (ТМ) связано с привнесением этих веществ речными водами в периоды половодий, когда дельта затопляется паводковыми водами и на ее территории накапливаются взвешенные наносы и мигрирую-

щие в составе взвешенных веществ различные химические соединения [8].

Начиная с 2007 г. в бассейне р. Дон наблюдается маловодный режим. Речной сток сократился до 13–16 км³/год [9] при норме 22 км³/год [10]. Следствием этого, с одной стороны, является рост солености Азовского моря [11, 12], а с другой — отсутствие паводков, приводящих к затоплению поймы и дельты Дона, и сезонное перераспределение стока в пользу повышенных расходов воды в летний и осенне-зимний периоды [13].

Весенних паводков, приносящих соединения ТМ на пойменные участки в дельте Дона, не наблюдалось уже более 30 лет, после 1994 г., а затопление дельты происходит преимущественно нагонными морскими водами [14].

Подробный анализ гидрологической и геоморфологической трансформации дельты Дона в условиях сокращения твердого стока р. Дон почти на 90 % с 1933 г. из-за зарегулирования плотинами показал, что после 1990 г. движение морского края дельты стало положительно коррелировать с максимальным уровнем воды на гидропосту в Азове (середина дельты), а его межгодовая динамика напрямую связана с частотой и интенсивностью штормовых нагонов морской воды из Таганрогского залива [14]. Предварительные оценки, выполненные с применением адаптированной к условиям дельты Дона гидрологической модели НЕС-RAS и согласованной с ней балансовой модели динамики взвешенного вещества, показали возможность поступления значительных масс наносов и соединений ТМ в дельту Дона и их накопления на пойменных участках [15].

Целью настоящей работы является описание условий загрязнения дельты Дона ПТЭ, прежде всего соединениями ТМ, в условиях низкого жидкого и сокращения твердого стоков р. Дон и влияния нагонных явлений. Мы показываем, как ПТЭ, мигрирующие в составе взвешенных наносов, могут загрязнять почвы пойменных участков дельты Дона и как это связано с нагонными явлениями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве региона исследования рассматривается часть устьевой области р. Дон от станицы Раздорская до условной границы авандельты в Таганрогском заливе (включает часть акватории залива от морского края дельты до линии по разрезу: коса Павло-Очаковская – ст. Морская) (рис. 1).

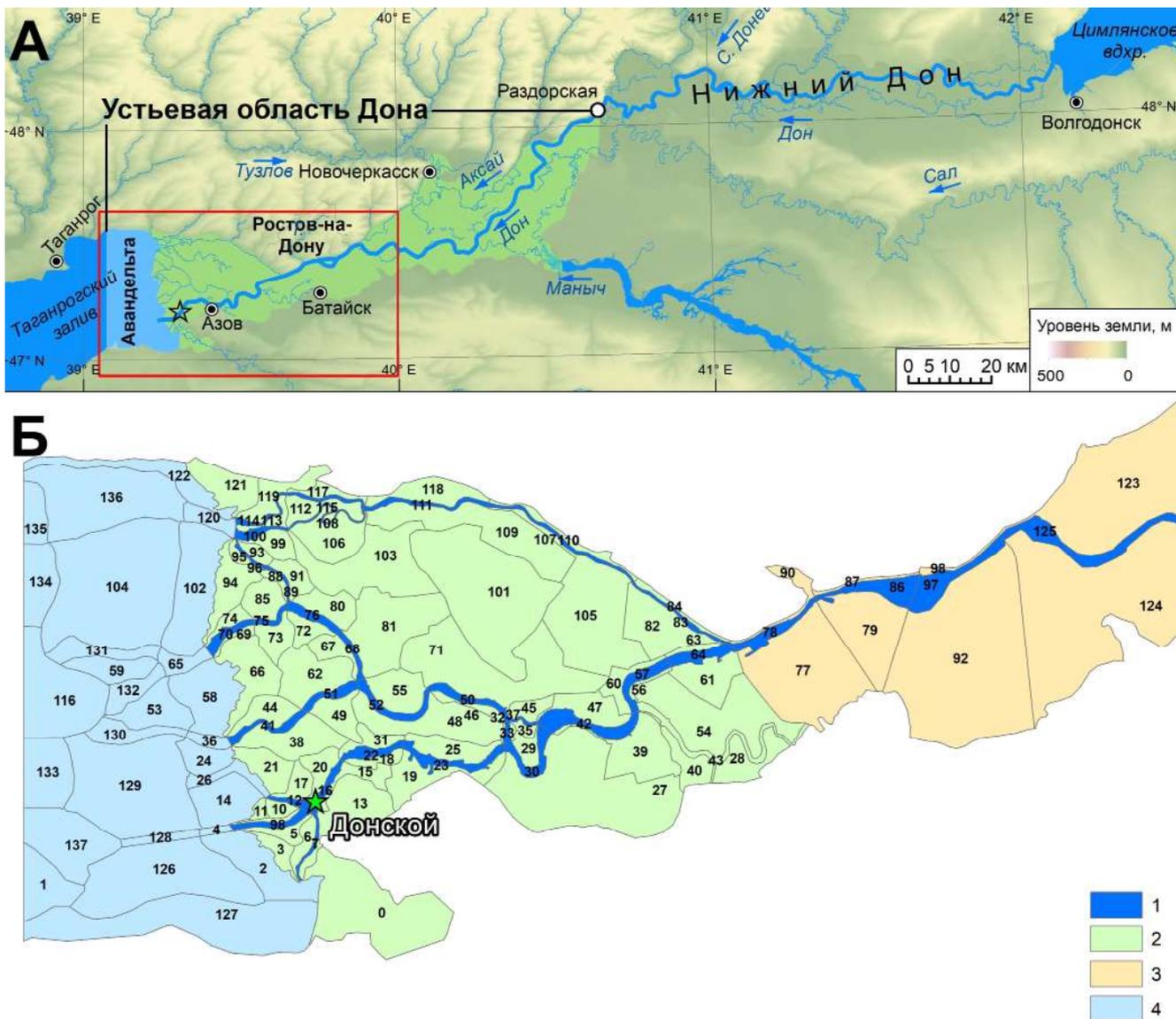


Рис. 1. Гидрологическое районирование устьевой области р. Дон: 1 — русла и каналы р. Дон; 2 — пойменные участки дельты Дона; 3 — пойменные участки р. Дон от ст. Раздорской до вершины дельты; 4 — районы авандельты

Fig. 1. Hydrological zoning of the Don River estuary: 1 — beds and channels of the Don River; 2 — floodplain areas of the Don Delta; 3 — floodplain areas of the Don River from stanitsa Razdorskaya to the top of the delta; 4 — avandelta areas

Использованы данные экспедиционных исследований сотрудников ЮНЦ РАН на участке Цимлянское водохранилище – нижний Дон – дельта Дона – восточная часть Таганрогского залива в 2006–2020 гг. [16].

Данные о содержании соединений тяжелых металлов (ТМ) в воде и взвешенном веществе получены из базы данных проекта 13-05-41528 РГО_а «Интегральная оценка эколого-геохимического состояния аквальных систем устьевой

области Дона» [17, 18], выполненного по совместной программе Российского фонда фундаментальных исследований и Русского географического общества в 2013–2017 гг.

Данные о содержании соединений ТМ в почвах дельты Дона предоставлены группой проф. Т.М. Минкиной, выполнившей их определение в образцах почвы [3].

Для оценки интенсивности нагонных явлений в дельте Дона использованы данные наблюдений

за уровнем воды на гидропосту (ГП) ЮНЦ РАН, расположенном в хуторе Донском [19] в период 2015–2020 гг.

Оценки твердого стока р. Дон в период 2009–2020 гг. выполнены на основе данных измерений расхода и мутности воды, полученных на гидрологическом посту в станции Раздорской, из Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [20] с применением методов WRTDS (Weighted Regressions on Time, Discharge, and Season — Взвешенные регрессии по времени, расходу и сезону) и WRTDSKalman (WRTDS с фильтрацией Калмана) [21].

Предложен подход к совместному применению гидрологической модели HEC-RAS и мультикомпарментальной балансовой модели для описания переноса и трансформации взвешенных веществ в устьевой области Дона [22, 23]. Выделены гидрологические районы (компарменты): русловые районы, пойменные районы, затапливаемые при высоких паводках и штормовых нагонах со стороны моря, и авандельта. Для описания потоков воды между районами, их скоростей, динамики уровня воды и процессов затопления поймы применяется детальная гидрологическая модель HEC-RAS, адаптированная к условиям устьевой области р. Дон — DonDeltaHECRAS. Для гидрологических районов строится динамическая модель баланса воды и веществ, переносимых водными массами — DonDeltaBalanceModel. Вво-

дится параметризация процессов оседания взвешенных веществ и их взмучивания (ресуспензии) в зависимости от скорости движения воды и размера частиц. Рассматривается три градации взеси по размерам: пелитовая фракция (глина), алевритовая фракция (ил) и мелкий песок. Акцент делается на оценке влияния морских штормовых нагонов на перенос взвешенных веществ в речную дельту и их оседание.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Твердый сток в период 2009–2020 гг.

Зарегулирование р. Дон оказало существенное влияние на поступление взвешенных наносов в устьевую область. Если сокращение твердого стока в створе ст. Раздорской относительно периода условно-естественного стока составило более 45 % (с 3,94 до 2,16 млн т/год) [24], то применительно к маловодным годам соответствующих периодов такое же сокращение составляет 77 % (с 2,41 до 0,56 млн т), а к современному периоду — 91 % (с 2,41 до 0,20 млн т) [21].

Помимо аккумуляции взвешенных наносов в чаще Цимлянского водохранилища, сокращению твердого стока р. Дон способствовало резкое уменьшение расходов воды, а следовательно, и транспортирующей способности реки в весенний период 2009–2020 гг. Это отражается на связи расхода наносов с расходом воды для маловодных лет разных периодов (рис. 2). В рассматриваемый период маловодья 2009–2020 гг. среднегодовая концентра-

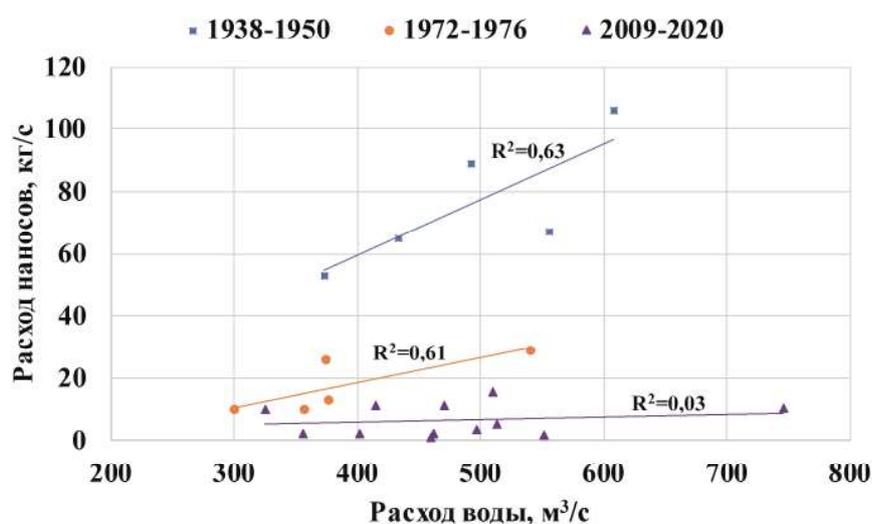


Рис. 2. Связь между среднегодовым расходом наносов и среднегодовым расходом воды в ст. Раздорская в маловодные годы разных периодов по [21]

Fig. 2. Relationship between the average annual sediment load and the average annual water discharge in stanitsa Razdorskaya in low water years of different periods according to [21]

ция TSS в отдельные годы (2009–2010, 2012–2016) находилась в интервале 2–9 мг/л, а в другие годы (2011, 2017–2020) — от 14 до 30 мг/л, демонстрируя слабую связь со среднегодовым расходом воды.

Поступление соединений ТМ со стоком Дона в вершину дельты

Для оценки поступления соединений рассматриваемых ТМ с речным стоком использованы значения их содержания в донской воде в растворенной и взвешенной формах, приведенные в табл. 1.

На основе восстановленных методом WRTDS Kalman значений суточных расходов взвешенных наносов в 2009–2020 гг. и данных о среднесуточном расходе воды рассчитано поступление рассматриваемых соединений ТМ в устьевую область Дона (рис. 3).

В среднем в 2009–2020 гг. в устьевую область ежегодно поступало 49,7 т Ni (при вариациях от 33,9 до 78,5), 146,8 т Cu (от 105,9 до 230,8), 7,8 т Pb (от 2,6 до 17,0) и 2,2 т Cd (от 1,6 до 3,4). Если соединения Ni, Cu, Cd поступали преимущественно в растворенной форме, то соединения Pb на 44,0–90,6 % — в составе взвешенного вещества.

Таблица 1. Оценки концентраций соединений металлов в воде, поступающей в дельту Дона [15]

Table 1. Estimates of metal compounds concentrations in water entering the Don Delta [15]

Компонент Component	Растворенная форма, мкг/дм ³ Dissolved form, μg/dm ³	Взвешенная форма, мкг/г Suspended form, μg/g
Ni	2,8	38
Cu	9,4	29
Pb	0,10	31
Cd	0,14	0,3

В связи с увеличением твердого стока в 2011 г. и в период 2017–2020 гг. вклад взвешенных форм рассматриваемых соединений ТМ увеличивается (рис. 3А), преимущественно за счет роста расхода воды и взвешенных наносов в летний и осенний периоды (рис. 3Б). Выделяется также 2018 г., когда весной наблюдался расход воды до 1930 м³/с при относительно небольших значениях мутности 5–7 мг/л.

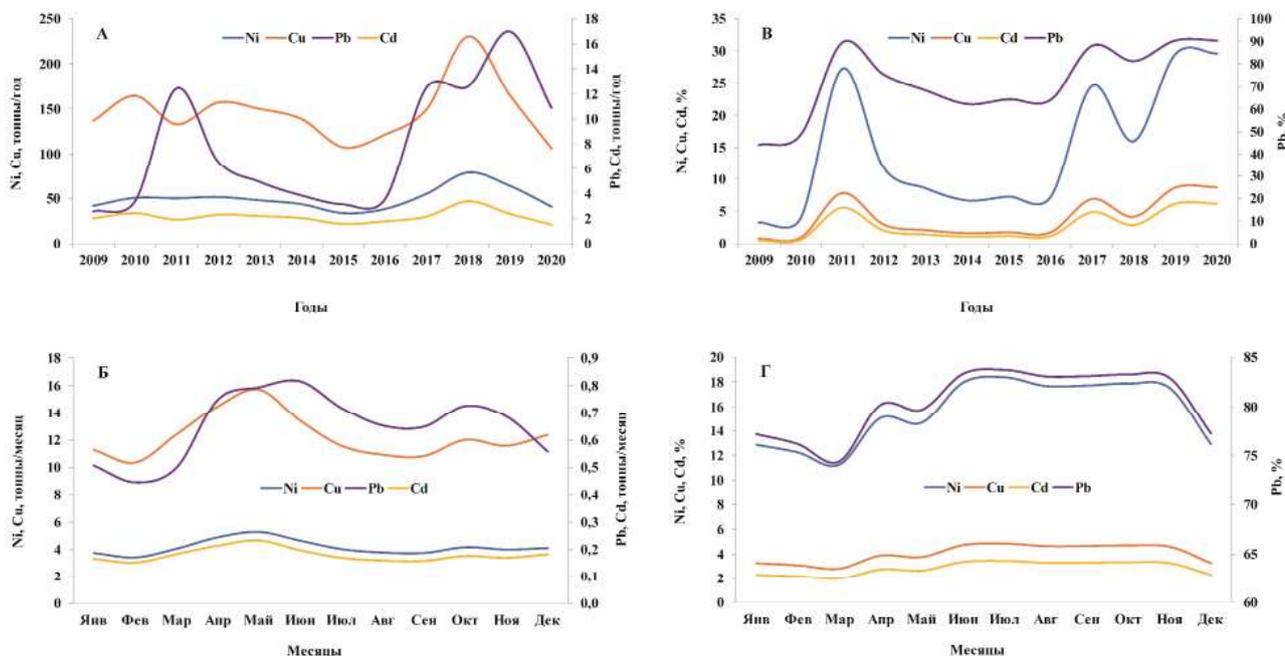


Рис. 3. Динамика соединений тяжелых металлов, поступающих с донской водой в устьевую область: А — годовой сток; Б — сезонная динамика стока; В — доля взвешенной формы миграции рассматриваемых соединений ТМ по годам; Г — по месяцам (среднее за период 2009–2020 гг.)

Fig. 3. Dynamics of heavy metal compounds entering the estuary with Don River water: А — annual runoff; Б — runoff seasonal dynamics; В — share of suspended form of migration of the investigated HM compounds by year; Г — by month (average for the period 2009–2020)

Нагонные явления в период маловодья и районирование дельты Дона по продолжительности затопления

С применением модели DonDeltaHECRAS выполнены гидрологические расчеты для шести типов нагонов (табл. 2) [22, 23]. Одним из важных результатов этих вычислительных экспериментов является оценка площади затопления дельты и ее распределение по глубине воды в зоне затопления (рис. 4).

По результатам этих расчетов и статистических характеристик нагонов в период наблюдений 2015–2020 гг. на гидрологическом посту ЮНЦ РАН в х. Донской [21] выполнено районирование пойменных районов дельты Дона по доле площади, которая в течение года находится под водой (табл. 3, рис. 5).

Затопление поймы при нагонных явлениях изменяет водный режим дельты. Помимо насыщения почвы влагой, вода из Таганрогского залива приносит растворенные и взвешенные вещества, в т. ч. и соединения ТМ. Как правило, нагоны сопровождаются волнением при юго-западных

ветрах, в результате которого взмучиваются донные отложения авандельты (устьевого взморья). Кроме того, вода с моря имеет повышенное содержание солей, особенно в современный период, когда соленость Азовского моря выросла до экстремальных значений 14–15 г/л [11, 25].

Ниже сделан акцент на поступление взвешенных наносов и соединений ТМ в дельту Дона при нагонах.

Потенциал накопления соединений ТМ в дельте Дона в результате нагонных явлений

С применением DonDeltaBalanceModel выполнены расчеты динамики взвешенных наносов для рассматриваемых 6 типов нагонов, получены оценки накопления взвешенных веществ в дельте Дона (табл. 2) [22, 23]. С учетом содержания во взвешенном веществе соединений ТМ получены оценки поступления ТМ в верхний слой почвы дельты Дона при нагонах (табл. 4).

Результаты моделирования демонстрируют, что в современный период маловодья, в отсутствие затопления поймы дельты при паводках, морской фактор может быть основным механизмом загряз-

Таблица 2. Характеристики расчетных сценариев нагонов в дельте Дона

Table 2. Characteristics of calculated scenarios of surges in the Don Delta

Даты нагона Dates of the surge	Максимальный подъем уровня воды от среднемноголетнего значения, м Maximum water level rise from the average annual value, m	Объем взвешенных наносов, осевших в результате нагона, тыс. т Volume of suspended sediment deposited as a result of the surge, thousand tons		Средний расход воды в ст. Раздорской за период нагона, м ³ /с Average water discharge in stanitsa Razdorskaya during the surge period, m ³ /s	Обеспеченность нагона, % Surge provision, %	Площадь затопления дельты, км ² Delta flooded area, km ²
		в дельте in the delta	в пойменных районах дельты in the delta floodplain areas			
23/09/2014–25/09/2014*	3,7	28,27	37,18	541	0,8	517
18/03/2018–21/03/2018	1,77	22,09	3,99	473	27	489
15/04/2020–18/04/2020	1,75	21,73	2,42	300	29	528
31/03/2016–03/04/2016	1,4	15,45	0,49	413	54	443
19/04/2018–22/04/2018	1,36	14,28	1,28	1440	59	434
22/02/2019–25/02/2019	1,06	10,23	0,28	517	85	403

Примечание: * При нагоне в эти даты в пойменных районах дельты осело взвешенных наносов больше, чем в целом по дельте из-за наличия эрозионных явлений в русловых районах на этапе спада нагона

Note: * During the surge, on these dates, the volume of suspended sediment deposited in the delta floodplain areas was greater than generally across the delta due to the erosion phenomena in the riverbed areas at the surge recession stage

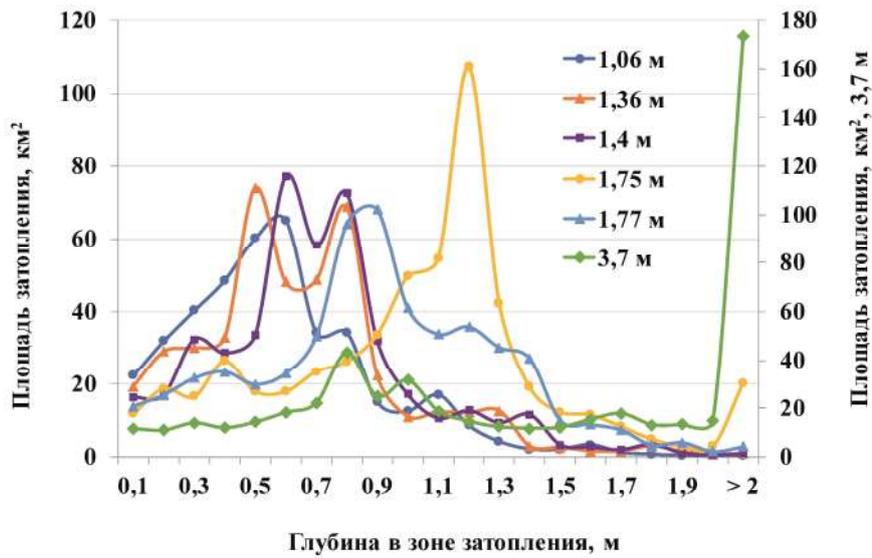


Рис. 4. Площадь затопления дельты Дона в зависимости от максимального уровня воды при нагоне при разных расходах воды в ст. Раздорская и ее распределение по глубине воды в зоне затопления

Fig. 4. Flooded area of the Don Delta depending on the maximum water level during surge at different water discharges in stanitsa Razdorskaya and its distribution by water depth in the flood zone

Таблица 3. Классификация гидрологических районов устьевой области Дона по уровню и продолжительности затопления при нагонах воды со стороны моря

Table 3. Classification of the hydrological regions of the Don River estuary by the level and duration of flooding during sea surges

Тип района Region type	Описание района Region description	Площадь, км ² Area, km ²	Находится под водой в течение года, % Being under water during the year, %	Доля площади пойменных районов дельты, % Share of the delta floodplain region area, %
0	Пойма Дона и незатапливаемые районы дельты Don River floodplain and non-flooded areas of the delta	1243,8	<1	–
1	Пойма дельты Delta floodplain	204,7	1–10	38,0
2	Пойма дельты Delta floodplain	184,1	10–20	34,2
3	Пойма дельты Delta floodplain	68,5	20–30	12,7
4	Пойма дельты Delta floodplain	22,5	30–40	4,2
5	Пойма дельты Delta floodplain	44,2	40–50	8,2
6	Пойма дельты Delta floodplain	14,7	>50	2,7
-1	Авандельта и рукава дельты Avandelta and delta branches	502,2	100	–
Всего Total		1782,6	–	–
В т. ч. дельта Including delta		538,8	–	100,0



Рис. 5. Районирование дельты Дона по характеру затопления при нагонных явлениях (пояснения см. в табл. 3)

Fig. 5. Don Delta zoning based on the nature of flooding during surge phenomena (see Table 3 for explanations)

Таблица 4. Оценка влияния нагонов на загрязнение почвы дельты Дона соединениями ТМ для гидрологических районов с разной продолжительностью затопления в течение года

Table 4. Assessment of the effect of surges on the Don Delta soil contamination by HM compounds for hydrological regions with different duration of flooding during the year

Номер региона по продолжительности затопления в течение года Region number by duration of flooding during the year	Среднее содержание ТМ в верхнем (20 см) слое почвы, мг/кг Average HM content in the top (20 cm) soil layer, mg/kg			Поступление ТМ в дельту в течение года с нагонами, мг/м ² /год HM input to the delta with surges during the year, mg/m ² /year				Изменение содержания металлов в верхнем (1 см) слое почвы за год из-за нагонов, % Change in metal content in the top (1 cm) soil layer per year due to surges, %		
	Ni	Cu	Pb	Ni	Cu	Pb	Cd*	Ni	Cu	Pb
0	–**	–	–	2,1	1,6	1,8	0,33	–	–	–
1	–	–	–	5,5	4,2	4,5	0,83	–	–	м
2	31,6	36,4	27,0	5,1	3,9	4,1	0,77	0,61	0,41	0,59
3	31,3	36,7	26,5	4,4	3,4	3,6	0,67	0,54	0,35	0,52
4	36,2	34,0	21,8	9,7	7,4	7,9	1,47	1,03	0,84	1,39
5	36,3	37,3	24,5	10,7	8,2	8,8	1,63	1,14	0,85	1,37
6	–	–	–	11,1	8,5	9,1	1,69	–	–	–

Примечание: * Для соединений Cd у нас нет данных по их содержанию в почвах дельты Дона; ** нет данных

Note: * For Cd compounds we have no data on their content in soils of the Don Delta; ** no data available

нения почвы дельты Дона соединениями ТМ в результате их переноса со взвесью из Таганрогского залива.

В результате обобщения выполненных оценок динамики взвешенного вещества в устьевой области

Дона в период маловодья под влиянием нагона воды со стороны моря получены количественные оценки вклада дельты Дона и устьевой взморья в «фильтрацию» химических соединений на пути их миграции с речными водами в Азовское море (табл. 5).

Таблица 5. Роль устьевой области Дона в качестве «фильтра» на пути миграции химических соединений в Азовское море**Table 5.** Role of the Don River estuary as a “filter” on the migration path of chemical compounds to the Azov Sea

Год Year	Сток взвешенных наносов, р. Дон, тыс. т/год* Suspended sediment runoff, Don River, thousand tons/year*	Осело взвешенных наносов в устьевой области, тыс. т/год** Deposition of suspended sediment in the estuary area, thousand tons/year**			Поступило соединений ТМ с речными водами во взвешенной форме, т/год Supply of HM compounds with river water in suspended form, tons/year				Осело соединений ТМ в устьевой области, т/год Deposition of HM compounds in the estuary area, tons/year			
		При нагонах During surges	Без учета нагонов Excluding surges	Всего Total	Ni	Cu	Pb	Cd	Ni	Cu	Pb	Cd
2015	65,2	2,85	10,0	12,81	2,5	1,9	2,0	0,020	0,49	0,37	0,39	0,004
2016	72,9	4,77	10,7	15,43	2,8	2,1	2,3	0,020	0,59	0,44	0,49	0,004
2017	356,8	11,48	54,7	66,16	13,6	10,3	11,1	0,110	2,52	1,91	2,06	0,020
2018	331,6	3,41	54,5	57,93	12,6	9,6	10,3	0,100	2,20	1,68	1,80	0,017
2019	496,6	20,57	76,3	96,90	18,9	14,4	15,4	0,150	3,69	2,81	3,00	0,029
2020	318,3	8,32	51,3	59,62	12,1	9,3	9,9	0,100	2,27	1,74	1,85	0,019

Примечание: * По [21]; ** по [22, 23]

Note: * Based on [21]; ** based on [22, 23]

ВЫВОДЫ

По результатам данного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В условиях малого объема годового жидкого и твердого стоков р. Дон и отсутствия весенних паводков пойменные участки дельты Дона не затопляются и взвешенные наносы и ассоциированные с ними ПТЭ практически не поступают на почву, а накапливаются в донных отложениях рукавов и выносятся на устьевое взморье.
2. Из-за уменьшения мутности донских вод изменилось соотношение форм миграции соединений ТМ в сторону превалирования растворенных в воде соединений (в меньшей степени — для соединений свинца).
3. В результате штормовых нагонов разной обеспеченности, с одной стороны, происходит поступление взвешенных форм ПТЭ на пойменные участки дельты в фазу развития нагона, где ПТЭ и оседают вместе со взвешенными наносами, а с другой стороны, на фазе спада нагона из-за повышенных скорос-

тей потоков воды происходят эрозия донных отложений в руслах дельты и вынос взвешенных ПТЭ на устьевое взморье.

4. Риск загрязнения прежде всего подвержены районы дельты с наибольшим временем затопления в течение года из-за нагонных явлений.
5. В любом случае, источником загрязнения дельты ПТЭ является их антропогенный сток. Если в период высокой воды и паводков, когда речная вода затопляет пойменные участки, накопление ПТЭ происходит за счет речного фактора, то в период маловодья и влияния нагонов антропогенные речные ПТЭ, после биогеохимической трансформации на устьевом взморье, в Таганрогском заливе и Азовском море, возвращаются в дельту при нагонах. Роль дельты и устьевой области в качестве «фильтра» на пути миграции растворенных и взвешенных форм ПТЭ из реки в море трансформировалась.

Вместе с тем, есть ряд факторов и явлений, которые не учтены в рамках данного подхода и требуют дальнейших исследований и оценки.

Растворенные формы соединений ТМ, поступающие в дельту в период нагонов, могут сорбироваться почвенными частицами, формировать устойчивые органо-минеральные формы, накапливаться в растениях (листьях, стеблях и корнях) и вызывать различные функциональные и морфологические изменения. С другой стороны, современный период характеризуется повышенной соленостью воды в Азовском море, вода Таганрогского залива также высокоминерализована и проникает глубоко в дельту [26]. При этом соленая вода влияет на растения и изменяет свойства миграции некоторых ТМ. Отмечено, что даже при низкой солености повышаются подвижность Cd и его поглощение растениями [27]. Кроме того, подвижные формы ТМ могут во время нагона проникать в грунтовые воды, а затем поступать в рукава при продолжительных сгонных явлениях [28]. При моделировании динамики взвешенного вещества не учтены процессы биогеохимической трансформации соединений ТМ в донных отложениях рукавов и устьевого взморья, влияния солености на коагуляцию и флокуляцию взвешенного вещества, особенно в присутствии органических соединений [29].

Растительность дельты может усиливать седиментационные процессы как в рукавах, так и на пойме дельты, увеличивать шероховатость среды и трансформировать гидрограф нагонной волны. Вода может задерживаться в локальных понижениях рельефа, но сильные нагоны, в свою очередь, влияют на растительность. Осенью, когда растения начинают отмирать, накопленные в них соединения ТМ дополнительно поступают на почву, а часть выносятся теми же нагонами обратно в реку и в залив. Пожары, природные и антропогенные, характерны для дельты, их частота, по-видимому, тесно связана с продолжительностью затопления участков поймы при нагонах. В результате пожаров накопленные в растениях соединения ТМ могут поступать не только в атмосферу, но и на почву, и вымываться из нее нагонными водами.

Все эти факторы в комплексе существенно изменяют гидрохимический режим в дельте Дона и требуют дальнейшего качественного и количественного анализа.

БЛАГОДАРНОСТИ

Публикация подготовлена в рамках реализации проекта Российского научного фонда № 22-27-00818

«Влияние длительного маловодья и изменений климата (на рубеже XX–XXI веков) на динамику взвешенного вещества в устьевой области Дона». Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Объединенный центр научно-технологического оборудования ЮНЦ РАН (исследование, разработка, апробация)» № 501994.

ACKNOWLEDGMENTS

This publication is executed as part of the project of the Russian Science Foundation No. 22-27-00818 “Effect of the long-term low water period and climate change (on the cusp of the 20th and 21st centuries) on the dynamics of suspended matter in the Don River estuary”. The work has been conducted using the equipment of the Shared Research Facility “Center of the Joint Use of Scientific and Technological Equipment of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (research, development, approbation)” No. 501994.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тайны дельты Дона. Природный парк «Донской», участок «Дельта Дона». URL: <https://oopt.donland.ru/activity/5222/> (дата обращения 10.10.2022).
2. ДЕМОСКОП Weekly. База данных основных демографических показателей населения России, СССР и стран мира. URL: <http://www.demoscope.ru/weekly/pril.php> (дата обращения 10.10.2022).
3. Konstantinova E.Yu., Minkina T.M., Nevidomskaya D.G., Mandzhieva S.S., Bauer T.V., Zamulina I.V., Voloshina M.S., Lobzenko I.P., Maksimov A., Sushkova S.N. Potentially toxic elements in surface soils of the Lower Don floodplain and the Taganrog Bay coast: sources, spatial distribution and pollution assessment. *Environmental Geochemistry and Health*. 2023. Vol. 45, no. 1: 101–119. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01019-5>.
4. Минкина Т.М., Федоров Ю.А., Невидомская Д.Г., Польшина Т.Н., Манджиева С.С., Чаплыгин В.А. Тяжелые металлы в почвах и растениях устья реки Дон и побережья Таганрогского залива. *Почвоведение*. 2017. № 9: 1074–1089. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17070061>.
5. Minkina T.M., Fedorenko G.M., Nevidomskaya D.G., Konstantinova E.Yu., Pol'shina T.N., Fedorenko A., Chaplygin V.A., Mandzhieva S.S., Dudnikova T.S., Hassan T. The morphological and functional organization of cattails *Typha laxmannii* Lepech. and *Typha australis* Schum. and Thonn. under soil pollution by potentially toxic elements. *Water*. 2021. Vol. 13, no. 2: e227. <https://doi.org/10.3390/w13020227>.
6. Konstantinova E.Yu., Minkina T.M., Nevidomskaya D.G., Mandzhieva S.S., Bauer T.V., Zamulina I.V.,

- Burachevskaya M.V., Sushkova S.N. Exchangeable form of potentially toxic elements in floodplain soils along the river-marine systems of Southern Russia. *Eurasian Journal of Soil Science*. 2021. Vol. 10, no. 2: 132–141. <https://doi.org/10.18393/ejss.838700>.
7. Konstantinova E.Yu., Minkina T.M., Mandzheva S.S., Nevidomskaya D.G., Bauer T.V., Zamulina I.V., Sushkova S.N., Lychagin M., Rajput V.D., Wong M.H. Ecological and human health risks of metal-PAH combined pollution in riverine and coastal soils of Southern Russia. *Water*. 2023. Vol. 15, no. 2: e234. <https://doi.org/10.3390/w15020234>.
 8. Михайлова М.В. Баланс наносов в устьях рек и формирование дельт при повышении и понижении уровня моря. *Водные ресурсы*. 2006. Т. 33, № 5: 567–579.
 9. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник 2018 / под ред. М.М. Трофимчука. Ростов-н/Д.: Изд-во Гидрохимического института Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 2019. 561 с.
 10. Сорокина В.В., Ивлиева О.В., Лурье П.М. Динамика стока на устьевых участках рек Дон и Кубань во второй половине XX века. *Вестник Южного научного центра Российской академии наук*. 2006. Т. 2, № 2: 58–67.
 11. Бердников С.В., Кулыгин В.В., Дашкевич Л.В. Причины стремительного роста солености воды Азовского моря в XXI веке. *Морской гидрофизический журнал*. 2023. Т. 39, № 6 (234): 760–778. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2023-6-760-778>.
 12. Жукова С.В., Мирзоян А.В., Шишкин В.М., Подмарева Т.И., Лутынская Л.А., Тарадина Е.А., Бурлачко Д.С., Карманов В.Г. Возможные сценарии формирования материкового стока и солености вод Азовского моря с учетом современных и перспективных тенденций изменения климата. *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2023. Т. 6, № 4: 7–30. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2023_6_4_7.
 13. Berdnikov S.V., Sorokina V.V., Kleshchenkov A.V., Tyutyunov Yu.V., Kulygin V.V., Kovaleva G.V., Bulysheva N.I. Marine indicators of climate change in the Azov Sea ecosystem. *Journal of Sea Research*. 2023. Vol. 193: e102373. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2023.102373>.
 14. Venevsky S., Berdnikov S.V., Day J.W., Sorokina V.V., Gong P., Kleshchenkov A.V., Kulygin V.V., Li W., Misirov S., Sheverdyayev I.V., Yuan C. Don River Delta hydrological and geomorphological transformation under anthropogenic and natural forcings. Dynamics of delta shoreline, risk of coastal flooding and related management options. *Ocean & Coastal Management*. 2024. Vol. 258: e107364. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107364>.
 15. Шевердяев И.В., Клещенков А.В. Выявление вклада нагонных явлений в поступление тяжелых металлов в дельту Дона. *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 5 (215): 582–594. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-5-582-594>.
 16. Клещенков А.В., Герасюк В.С., Кулыгин В.В., Бердников С.В. Взвешенное вещество вод от Цимлянского водохранилища до Таганрогского залива в период длительного маловодья 2006–2020 гг. *Наука Юга России*. 2022. Т. 19, № 1: 29–39. <https://doi.org/10.7868/25000640230104>.
 17. Бердников С.В., Сорокина В.В., Поважный В.В., Ткаченко А.Н., Ткаченко О.В. Сезонная и пространственная динамика концентраций взвешенных веществ, биогенных элементов и тяжелых металлов в дельте Дона в 2012–2014 гг. *Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод: матер. науч. конф. с междунар. участием (г. Ростов-на-Дону, 8–10 сентября 2015 г.)*. Ростов-н/Д.: Изд-во Гидрохимического института Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 2015. Т. 1: 141–145.
 18. Ткаченко А.Н., Ткаченко О.В., Лычагин М.Ю., Касимов Н.С. Потоки тяжелых металлов в аквальных системах дельт Дона и Кубани. *Доклады Академии наук*. 2017. Т. 474, № 2: 234–237. <https://doi.org/10.7868/S0869565217140201>.
 19. Система мониторинга Южного научного центра Российской академии наук. URL: <https://meteo.ssc-ras.ru/> (дата обращения 10.10.2022).
 20. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения 10.10.2022).
 21. Лихтанская Н.В., Бердников С.В., Клещенков А.В. Твердый сток реки Дон и поступление взвеси в дельту при нагонах: статистическое моделирование и сопоставление в период маловодья. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023. Т. 23, № 4: ES4010. <https://doi.org/10.2205/2023ES000856>.
 22. Бердников С.В., Шевердяев И.В., Клещенков А.В., Кулыгин В.В. Совместное применение гидрологической модели НЕС RAS и мультикомпарментальной балансовой модели для описания переноса и трансформации взвешенных веществ в речной дельте: случай устьевой области р. Дон. 2023. <https://doi.org/10.24108/preprints-3112769>. URL: <https://preprints.ru/article/1073> (дата обращения 05.08.2024).
 23. Бердников С.В., Шевердяев И.В., Клещенков А.В., Кулыгин В.В., Лихтанская Н.В. Моделирование переноса и накопления взвешенных веществ в условиях маловодья и нагонных явлений в устьевой области р. Дон. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024. Т. 24. <https://doi.org/10.2205/2024ES000926>.
 24. Бронфман А.М., Хлебников Е.П. Азовское море: основы реконструкции. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 272 с.

25. Бердников С.В., Дашкевич Л.В., Кулыгин В.В. Новое состояние гидрологического режима Азовского моря в XXI веке. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2022. Т. 503, № 1: 65–70. <https://doi.org/10.31857/S2686739722030057>.
26. Клещенко А.В., Московец А.Ю. Интрузии соленых вод в дельту Дона: закономерности развития и последствия. *Наука Юга России*. 2021. Т. 17, № 3: 30–37. <https://doi.org/10.7868/S25000640210304>.
27. Du Laing G.D., De Vos R., Vandecasteele B., Lesage E., Tack F.M.G., Verloo M.G. Effect of salinity on heavy metal mobility and availability in intertidal sediments of the Scheldt estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2008. Vol. 77, no. 4: 589–602. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.10.017>.
28. Матишов Г.Г., Григоренко К.С., Чеха М.М., Аleshina Е.Г. Мониторинг гидрохимических преобразований на взморье Дона в реальном времени. *Наука Юга России*. 2023. Т. 19, № 2: 20–32. <https://doi.org/10.7868/S25000640230204>.
29. Герасюк В.С., Бердников С.В. Экспериментальная оценка скорости осаждения взвешенного вещества вод в устье Дона и Таганрогском заливе. *Океанология*. 2021. Т. 61, № 5: 780–790. <https://doi.org/10.31857/S0030157421040055>.
30. Chaplygin V.A., Mandzhieva S.S., Dudnikova T.S., Hassan T. The morphological and functional organization of cattails *Typha laxmannii* Lepech. and *Typha australis* Schum. and Thonn. under soil pollution by potentially toxic elements. *Water*. 2021. Vol. 13, no. 2: e227. <https://doi.org/10.3390/w13020227>.
31. Konstantinova E.Yu., Minkina T.M., Nevidomskaya D.G., Mandzhieva S.S., Bauer T.V., Zamulina I.V., Burachevskaya M.V., Sushkova S.N. Exchangeable form of potentially toxic elements in floodplain soils along the river-marine systems of Southern Russia. *Eurasian Journal of Soil Science*. 2021. Vol. 10, no. 2: 132–141. <https://doi.org/10.18393/ejss.838700>.
32. Konstantinova E.Yu., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Nevidomskaya D.G., Bauer T.V., Zamulina I.V., Sushkova S.N., Lychagin M., Rajput V.D., Wong M.H. Ecological and human health risks of metal-PAH combined pollution in riverine and coastal soils of Southern Russia. *Water*. 2023. Vol. 15, no. 2: e234. <https://doi.org/10.3390/w15020234>.
33. Mikhailova M.V. Sediment balance at river mouths and the formation of deltas at rising or falling sea level. *Water Resources*. 2006. Vol. 33, no. 5: 523–534. <https://doi.org/10.1134/S009780780605006X>.
34. Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiyskoy Federatsii. Ezhegodnik 2018 [Surface water quality of the Russian Federation. Yearbook 2018]. M.M. Trofimchuk (ed.). Rostov-on-Don: Gidrokhimicheskiy institut Federal'noy sluzhby po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy [Hydrochemical Institute of the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring] Publ., 2019. 561 p. (In Russian).
35. Sorokina V.V., Ivlieva O.V., Lurye P.M. Dinamika stoka na ust'evykh uchastkakh rek Don i Kuban' vo vtoroy polovine XX veka [River flow alteration in the Don and the Kuban mouths, the second part of XX century]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk [Bulletin of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences]*. 2006. Vol. 2, no. 2: 58–67. (In Russian).
36. Berdnikov S.V., Kulygin V.V., Dashkevich L.V. Reasons for rapid increase of water salinity in the Sea of Azov in the 21st century. *Physical Oceanography*. 2023. Vol. 30, no. 6: 714–730.
37. Zhukova S.V., Mirzoyan A.V., Shishkin V.M., Podmareva T.I., Lutynskaya L.A., Taradina E.A., Burlachko D.S., Karmanov V.G. Vozmozhnye stsenarii formirovaniya materikovogo stoka i solenosti vod Azovskogo morya s uchetom sovremennykh i perspektivnykh tendentsiy izmeneniya klimata [Possible scenarios for the formation of the continental runoff and the salinity of the Azov Sea, taking into account the current and future trends in climate change]. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya [Aquatic Bioresources & Environment]*. 2023. Vol. 6, no. 4: 7–30. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2023_6_4_7. (In Russian).

REFERENCES

1. Tayny del'ty Dona. Prirodnyy park “Donskoy”, uchastok “Del'ta Dona” [Secrets of the Don Delta. “Don River” Nature Reserve, “Don Delta” site]. Available at: <https://oopt.donland.ru/activity/5222/> (accessed 10.10.2022). (In Russian).
2. DEMOSKOP Weekly. Baza dannykh osnovnykh demograficheskikh pokazateley naseleniya Rossii, SSSR i stran mira [DEMOSCOPE Weekly. Database of the main demographic characteristics of the population of Russia, USSR and countries of the world]. Available at: <http://www.demoscope.ru/weekly/pril.php> (accessed 10.10.2022). (In Russian).
3. Konstantinova E.Yu., Minkina T.M., Nevidomskaya D.G., Mandzhieva S.S., Bauer T.V., Zamulina I.V., Voloshina M.S., Lobzenko I.P., Maksimov A., Sushkova S.N. Potentially toxic elements in surface soils of the Lower Don floodplain and the Taganrog Bay coast: sources, spatial distribution and pollution assessment. *Environmental Geochemistry and Health*. 2023. Vol. 45, no. 1: 101–119. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01019-5>.
4. Minkina T.M., Fedorov Yu.A., Nevidomskaya D.G., Pol'shina T.N., Mandzhieva S.S., Chaplygin V.A. Heavy metals in soils and plants of the Don River estuary and the Taganrog Bay coast. *Eurasian Soil Science*. 2017. Vol. 50, no. 9: 1033–1047. <https://doi.org/10.1134/S1064229317070067>.
5. Minkina T.M., Fedorenko G.M., Nevidomskaya D.G., Konstantinova E.Yu., Pol'shina T.N., Fedorenko A.,

13. Berdnikov S.V., Sorokina V.V., Kleshchenkov A.V., Tyutyunov Yu.V., Kulygin V.V., Kovaleva G.V., Bulysheva N.I. Marine indicators of climate change in the Azov Sea ecosystem. *Journal of Sea Research*. 2023. Vol. 193: e102373. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2023.102373>.
14. Venevsky S., Berdnikov S.V., Day J.W., Sorokina V.V., Gong P., Kleshchenkov A.V., Kulygin V.V., Li W., Misirov S., Sheverdyayev I.V., Yuan C. Don River Delta hydrological and geomorphological transformation under anthropogenic and natural forcings. Dynamics of delta shoreline, risk of coastal flooding and related management options. *Ocean & Coastal Management*. 2024. Vol. 258: e107364. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107364>.
15. Sheverdyayev I.V., Kleshchenkov A.V. Revealing the surge phenomena contribution of the heavy metals inflow to the River Don Delta. *Physical Oceanography*. Vol. 27, no. 5: 535–546. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2020-5-535-546>.
16. Kleshchenkov A.V., Gerasyuk V.S., Kulygin V.V., Berdnikov S.V. Vzveshennoe veshchestvo vod ot Tsimlyanskogo vodokhranilishcha do Taganrogskego zaliva v period dlitel'nogo malovod'ya 2006–2020 gg. [Suspended matter of the water from the Tsimlyansk Reservoir to the Taganrog Bay in the period of long low water in 2006–2020]. *Nauka Yuga Rossii [Science in the South Russia]*. 2022. Vol. 19, no. 1: 29–39. <https://doi.org/10.7868/25000640230104>. (In Russian).
17. Berdnikov S.V., Sorokina V.V., Povazhnyy V.V., Tkachenko A.N., Tkachenko O.V. Sezonnaya i prostranstvennaya dinamika kontsentratsiy vzveshennykh veshchestv, biogennykh elementov i tyazhelykh metallov v del'te Dona v 2012–2014 gg. [Seasonal and spatial dynamics of total suspended matter, nutrients and heavy metals concentrations in the Don Delta in 2012–2014]. In: *Sovremennyye problemy gidrokhimii i monitoringa kachestva poverkhnostnykh vod: materialy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (g. Rostov-na-Donu, 8–10 sentyabrya 2015 g.) [Modern problems of hydrochemistry and monitoring of surface water quality. Proceedings of the Scientific Conference with international participation (Rostov-on-Don, 8–10 September, 2015)]*. Rostov-on-Don: Gidrokhimicheskiy institut Federal'noy sluzhby po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy [Hydrochemical Institute of the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring] Publ., 2015. Vol. 1: 141–145. (In Russian).
18. Tkachenko A.N., Tkachenko O.V., Lychagin M.Yu., Kasimov N.S. Heavy metal flows in aquatic systems of the Don and Kuban River Deltas. *Doklady Earth Sciences*. 2017. Vol. 474, no. 1: 587–590. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1705018X>.
19. Sistema monitoringa Yuzhnogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk [Monitoring system of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences]. Available at: <https://meteo.ssc-ras.ru/> (accessed 10.10.2022). (In Russian).
20. Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnykh ob'ektov [Automated information system for state monitoring of water bodies]. Available at: <https://gmvo.skniivh.ru> (accessed 10.10.2022). (In Russian).
21. Likhtanskaya N.V., Berdnikov S.V., Kleshchenkov A.V. Tverdyy stok reki Don i postuplenie vzvesi v del'tu pri nagonakh: statisticheskoe modelirovanie i sopostavlenie v period malovod'ya [Solid runoff of the Don River and suspended matter flow into the delta during surges: Statistical modeling and comparison in the low water period]. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023. Vol. 23, no. 4: ES4010. <https://doi.org/10.2205/2023ES000856>. (In Russian).
22. Berdnikov S.V., Sheverdyayev I.V., Kleshchenkov A.V., Kulygin V.V. Sovmestnoe primenenie gidrologicheskoy modeli HEC RAS i mul'tikompartmental'noy balansovoy modeli dlya opisaniya perenosa i transformatsii vzveshennykh veshchestv v rechnoy del'te: sluchay ust'evoy oblasti r. Don [Combined application of the hydrological model HEC RAS and a multicompartamental balance model to describe the transport and transformation of suspended solids in a river delta: A case study of the Don River estuary area]. 2023. <https://doi.org/10.24108/preprints-3112769>. Available at: <https://preprints.ru/article/1073> (accessed 05.08.2024). (In Russian).
23. Berdnikov S.V., Sheverdyayev I.V., Kleshchenkov A.V., Kulygin V.V., Likhtanskaya N.V. Modelirovanie perenosa i nakopleniya vzveshennykh veshchestv v usloviyakh malovod'ya i nagonnykh yavleniy v ust'evoy oblasti r. Don [Modeling the transport and deposition of suspended solids under conditions of low water and surge phenomena in the Don River estuary area]. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024. Vol. 24. <https://doi.org/10.2205/2024ES000926>. (In Russian).
24. Bronfman A.M., Khlebnikov E.P. Azovskoe more: osnovy rekonstruktsii [Sea of Azov: principles of reconstruction]. Leningrad: Gidrometeoizdat [Hydrometeorological Publishing House], 1985. 272 p. (In Russian).
25. Berdnikov S.V., Dashkevich L.V., Kulygin V.V. A new state in the hydrological regime of the Sea of Azov in the 21st century. *Doklady Earth Sciences*. 2022. Vol. 503, no. 1: 123–128. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22030059>.
26. Kleshchenkov A.V., Moskovets A.Yu. Intruzii solenyykh vod v del'tu Dona: zakonomernosti razvitiya i posledstviya [Salt water intrusions into the Don River Delta: Development patterns and consequences]. *Nauka Yuga Rossii [Science in the South Russia]*. 2021. Vol. 17, no. 3: 30–37. <https://doi.org/10.7868/S25000640210304>. (In Russian).

27. Du Laing G.D., De Vos R., Vandecasteele B., Lesage E., Tack F.M.G., Verloo M.G. Effect of salinity on heavy metal mobility and availability in intertidal sediments of the Scheldt estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2008. Vol. 77, no. 4: 589–602. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.10.017>.
28. Matishov G.G., Grigorenko K.S., Chekha M.M., Aleshina E.G. Monitoring gidrokhimicheskikh preobrazovaniy na vzmor'e Dona v real'nom vremeni [Monitoring of hydrochemical transformations on the Don seashore in real time]. *Nauka Yuga Rossii [Science in the South Russia]*. 2023. Vol. 19, no. 2: 20–32. <https://doi.org/10.7868/S25000640230204>. (In Russian).
29. Gerasyuk V.S., Berdnikov S.V. Experimental estimation of the deposition rate of water suspended particulate matter in the mouth of the Don River and in Taganrog Bay. *Oceanology*. 2021. Vol. 61, no. 5: 687–696. <https://doi.org/10.1134/S0001437021040056>.

Об авторах:

Бердников Сергей Владимирович, доктор географических наук, директор ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), ORCID 0000-0002-3095-5532, berdnikovsv@yandex.ru

Герасюк Виктория Сергеевна, младший научный сотрудник ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), ORCID 0000-0003-0445-0044, gerasyuk.v@mail.ru

Клещенков Алексей Владимирович, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), ORCID 0000-0002-7976-6951, kle-aleksej@yandex.ru

Кулыгин Валерий Валерьевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), ORCID 0000-0001-9748-6497, kulygin@sscras.ru

Лихтанская Наталия Викторовна, научный сотрудник ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), ORCID 0000-0001-8612-6808, natalikht@gmail.com

Шевурдяев Игорь Викторович, кандидат географических наук, научный сотрудник ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), ORCID 0000-0001-9212-8471, ig71089@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.10.2024

Поступила после рецензии 23.10.2024

Принята к публикации 24.10.2024

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант.

Received 08.10.2024

Revised 23.10.2024

Accepted 24.10.2024

Conflict of interest statement

The authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Водные биоресурсы и среда обитания
2024, том 7, номер 4, с. 22–39
<http://journal.azniirrh.ru>, www.azniirrh.ru
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online



Aquatic Bioresources & Environment
2024, vol. 7, no. 4, pp. 22–39
<http://journal.azniirrh.ru>, www.azniirrh.ru
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online

УДК 556.16:556.18(282)

https://doi.org/10.47921/2619-1024_2024_7_4_22

EDN: GGEDIA



Для цитирования: Жукова С.В., Подмарева Т.И., Тарадина Е.А., Лутынская Л.А., Бурлачко Д.С., Карманов В.Г., Бугаев Л.А., Белоусов В.Н. Эколого-рыбохозяйственные аспекты формирования современного гидрологического режима водных объектов Азово-Донского района. Часть 1: Антропогенные и климатические изменения стока реки Дон; рыбохозяйственные требования к водным объектам Нижнего Дона. *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2024. Т. 7, № 4: 22–39. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2024_7_4_22.

For citation: Zhukova S.V., Podmareva T.I., Taradina E.A., Lutynskaya L.A., Burlachko D.S., Karmanov V.G., Bugaev L.A., Belousov V.N. Ecological and fisheries aspects of the formation of the modern hydrological regime of the water bodies of the Azov–Don Region. Part 1: Anthropogenic and climatic changes in the flow of the Don River; fisheries requirements for the water bodies of the Lower Don. *Aquatic Bioresources & Environment*. 2024. Vol. 7, no. 4: 22–39. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2024_7_4_22. (In Russian).

ЭКОЛОГО-РЫБОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННОГО ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ АЗОВО-ДОНСКОГО РАЙОНА ЧАСТЬ 1: АНТРОПОГЕННЫЕ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТОКА РЕКИ ДОН; РЫБОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВОДНЫМ ОБЪЕКТАМ НИЖНЕГО ДОНА

С. В. Жукова*, Т. И. Подмарева, Е. А. Тарадина, Л. А. Лутынская,
Д. С. Бурлачко, В. Г. Карманов, Л. А. Бугаев, В. Н. Белоусов

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»),
Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»), Ростов-на-Дону 344002, Россия

*E-mail: zhukovasyv@azniirrh.vniro.ru

Аннотация

Введение. В работе, состоящей из двух частей, рассматриваются эколого-рыбохозяйственные аспекты антропогенных и климатических преобразований гидрологического режима в бассейне р. Дон, регламентируемое и фактическое выполнение требований рыбохозяйственного комплекса к водным ресурсам Нижнего Дона (Часть 1); в ней также освещаются вопросы соответствия современного геоботанического состояния пойменных нерестилищ Нижнего Дона рыбохозяйственным требованиям, изменения условий среды обитания водных биоресурсов Таганрогского залива как приемной емкости для адаптации молоди рыб к морским условиям и эффективности работы Усть-Манычских рыбоходных каналов в нерестовый период (Часть 2). Функционирование водной и околородной экосистем Азово-Донского района, равно как и процессы естественного воспроизводства рыб, зависит от гидрологического режима р. Дон, степени воздействия антропогенных и климатических факторов, а также методов управления водными ресурсами