© Григоренко К. С., Сорокина В. В., Шевердяев И. В., Солтан А. А., Сушко К. С., Клещенков А. В., Сойер В. Г., Алешина Е. Г., 2022, Океанологические исследования, 2022, Том 50, № 4, С. 73–100

УДК 502.5:550.461(470.61+282.247.366) DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(4).4

АКТУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИ ПЕРЕСЫХАЮЩИХ АКВАТОРИЙ В КОНТЕКСТЕ УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА (НА ПРИМЕРЕ БАССЕЙНА НИЖНЕГО ДОНА)

К. С. Григоренко, В. В. Сорокина, И. В. Шевердяев, А. А. Солтан, К. С. Сушко, А. В. Клещенков, В. Г. Сойер, Е. Г. Алешина

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН,
Россия, 344006, Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41,
e-mail: klim_grig@mail.ru

Для изучения биогеохимических циклов элементов, главным образом углерода, в переходных зонах между сушей и водой проведены исследования в водоемах дельты Дона и Западного Маныча. Выявлены основные физико-географические процессы, определяющие поставку, перенос и трансформацию органического вещества и связность водных и наземных экосистем. На основе сопоставления данных ДЗЗ в ArcGIS за период 1985–2021 гг. установлено сокращение площади поверхности водного зеркала водоемов в среднем на 15–16 % (в дельте Дона, главным образом, за счет разрушения рукотворных прудов, на Маныче – за счет понижения уровня воды). Вследствие отсутствия гидрологического потока возможно замедление биогеохимических процессов на осушенных территориях и смена одного типа процессов на другой.

В дельте Дона под воздействием сгонно-нагонных явлений зафиксировано смещение геохимических барьеров в сторону реки при нагонах, увеличение доли минерализованного подземного стока при сгонах. Для системы водоемов Западного Маныча отмечено наличие градиентов солености между его отдельными частями. Исследованиями установлено, что зоны смешения пресной и соленой воды – биогеохимические «горячие точки» – характеризуются контрастным химическим составом и сильно различающимися концентрациями органического и взвешенного вещества.

При продолжающемся маловодье на Нижнем Дону отмечена тенденция к существенному изменению строения верхней части профиля аллювиальных почв дельты реки. Определены районы с разной степенью проявления почвообразовательных процессов, а также основные природные и антропогенные факторы, контролирующие эти процессы.

Ключевые слова: водно-болотные угодья, водно-наземные границы, степная зона, природные воды, почвы, цикл углерода, Нижний Дон

Введение

Водные ресурсы степной зоны имеют огромное значение для поддержания нормального состояния природных и природно-техногенных экосистем, являются частью глобального водного цикла и цикла углерода, необходимы для полноценного функционирования народного хозяйства.

По причине климатических изменений и антропогенного вмешательства (как прямого, так и косвенного воздействия) водные ресурсы подвергаются

перераспределению и сокращению. Происходит изменение границ водных объектов и водных путей. Из-за своего географического положения в зоне недостаточного увлажнения многие водные объекты подвержены периодическому частичному или полному пересыханию.

Знание локальных и региональных бюджетов углерода водных экосистем (например, рек, озер, лиманов) улучшилось в последнее время, что позволяет по-новому оценить важную роль, которую эти компоненты играют в глобальном углеродном цикле. Тем не менее, исследования в наземных и водных системах были в значительной степени отделены друг от друга. До недавнего времени отсутствовали данные наблюдений и модели, необходимые для адекватного понимания ключевых экологических, биогеохимических, гидрологических и физических процессов, которые взаимодействуют на наземно-водных границах и обеспечивают обратную связь с земной системой (U.S. DOE, 2017). Определенных успехов удалось достичь ученым в рамках проекта «Каскады углерода с суши в океан в антропоцене» (C-CASCADES) (Carbon…, 2022) исследовательской программы Европейского союза HORIZON 2020.

Роль водных объектов степной зоны России в региональных и глобальных биогеохимических циклах исследована недостаточно. Слабо изучены процессы, происходящие на наземно-водных границах, представляющих собой динамические и сложные компоненты системы Земли. Общими чертами всех этих экосистем является то, что они богаты углеродом, имеют большой потенциал для потока углекислого газа и метана, повсеместно распространены в мире и чувствительны к изменениям климата в результате повышения уровня моря, изменения уровня грунтовых вод и засухи.

Одним из ключевых направлений Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 годы (ФНТП) является мониторинг и прогнозирование доступности и качества водных ресурсов, состояния природных и антропогенно измененных экосистем, относящихся к числу критически важных с точки зрения качества жизни населения страны как в экологическом, так и в климатическом аспектах.

В рамках реализации ФНТП в Южном научном центре Российской академии наук (ЮНЦ РАН) в 2022 г. создана молодежная лаборатория многокомпонентного мониторинга периодически пересыхающих акваторий юга России. Учеными ЮНЦ РАН начата реализация проекта «Изучение гидроклиматических особенностей периодически пересыхающих акваторий юга России в контексте глобального углеродного цикла» (рисунок 1).

Мы считаем необходимым использование в такого рода исследовании бассейнового подхода и принципов теории био- и геохимии ландшафтов (Корытный, 2001), концепций водного континуума (например, Xenopoulos, Downing, 2017) и наземно-водных границ (terrestrial-aquatic interfaces – TAI) (например, McClain, Boyer, 2003; U.S. DOE, 2017).

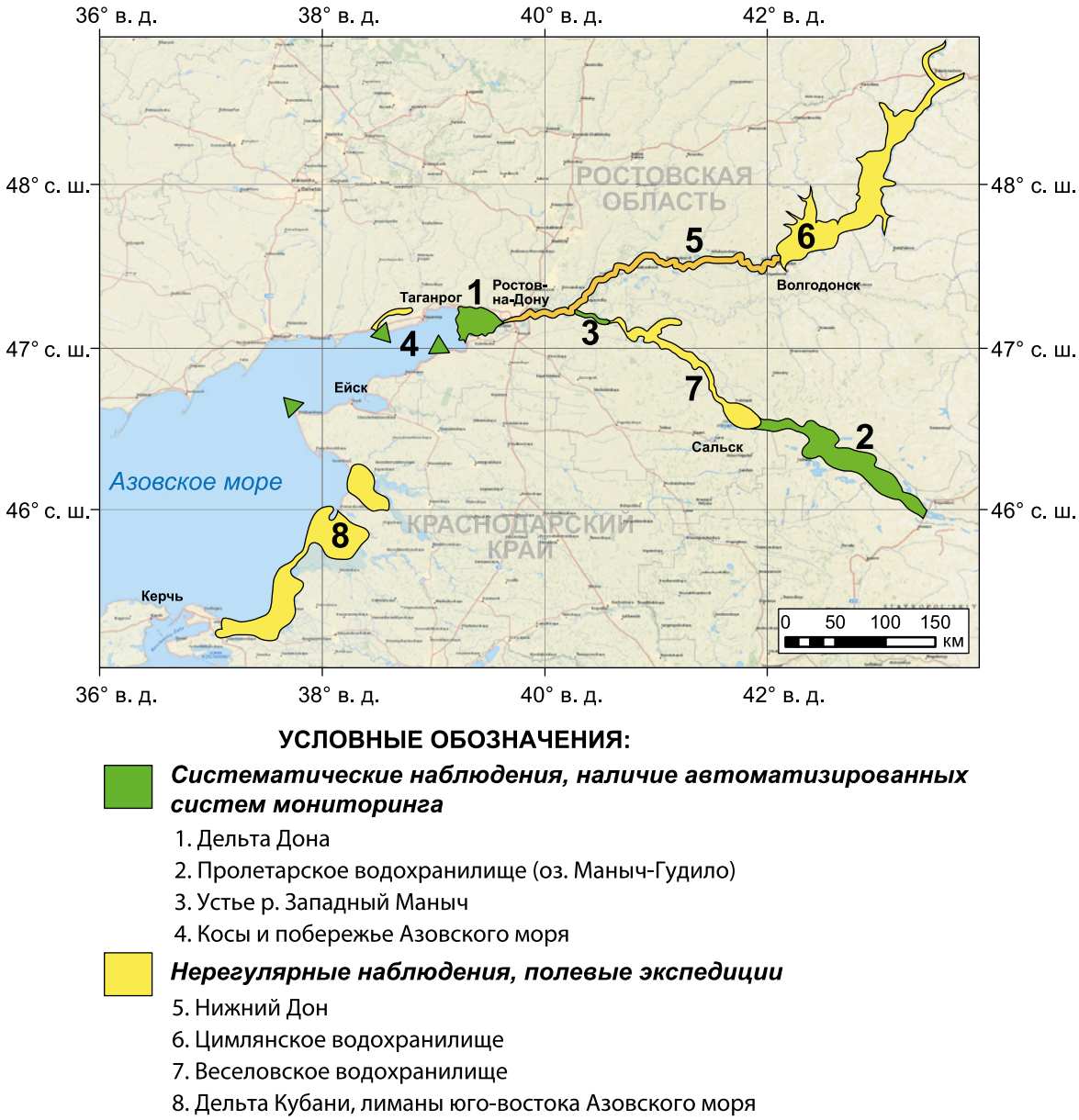

Рис. 1 – Картосхема территорий, подверженных процессам периодического затопления и пересыхания в результате колебания уровня воды

В данной работе в качестве объекта исследования мы рассматриваем водосбор Нижнего Дона, концентрируя внимание на дельте Дона и водоемах Кумо-Манычской впадины. Благодаря своим гидроклиматическим особенностям, рассматриваемые водоемы постоянно/периодически осушаются или затапливаются, т.е. создаются переходные области между полностью наземной и полностью водной средой. Эти области представляют собой динамические и сложные компоненты системы Земли. Они обладают уникальными биологическими, гидрологическими и биогеохимическими свойствами, которые обеспечивают исключительно высокие показатели биологической продуктивности и биогеохимического цикла. Границы водных объектов характеризуются высокими физическими и биогеохимическими градиентами, что приводит

к непропорционально высокой скорости реакции и оборота (так называемым «горячим точкам» и «горячим моментам»). Процессы, происходящие на этих границах, контролируют экологическое состояние пресноводных экосистем, а также выступают в качестве стока и/или источника потоков вещества на ландшафтном уровне. Ученые считают, что эти переходные зоны регулируют земную систему на уровне, намного превышающем область, которую они занимают.

Цель работы заключается в определении на водосборе Нижнего Дона областей (водоемов и прибрежных зон, водно-болотных угодий), потенциально значимых для изучения периодически пересыхающих акваторий в контексте углеродного цикла. Мы исследуем наземно-водные границы, чтобы определить в том числе возможное наличие «горячих точек» и «горячих моментов» круговорота элементов для дальнейшего, более детального их изучения, что будет способствовать в конечном счете эффективному управлению водными и почвенными ресурсами.

Научной основой нашего исследования является база данных гидролого-гидрохимических показателей состояния водных объектов и почвенного покрова в бассейне Нижнего Дона, накопленная в ЮНЦ РАН за 2002–2021 годы. Данные полевых наблюдений мы сочетаем с информацией, полученной с использованием ДЗЗ.

Характеристика природных условий и антропогенной деятельности в бассейне Нижнего Дона

Бассейн Нижнего Дона занимает южную часть Русской равнины, включает развитые в индустриальном и сельскохозяйственном отношении области, насыщен транспортными связями и выходами к Азовскому, Черному и Каспийскому морям.

Рассматриваемая территория находится в умеренном климатическом поясе в Атлантико-континентальной степной области, в ее западной подобласти (по классификации Б. А. Алисова). Климатические условия в бассейне определяются процессами атмосферной циркуляции умеренных широт, преобладают умеренные воздушные массы (68 %), а также тропические (21 %) и арктические (11 %) (Панов и др., 2006). Ветровой режим формируется под воздействием широтной циркуляции (господствуют ветры восточного и западного направлений). Часто отмечаются сильные ветры, скорость которых более 15 м/с. Данная территория характеризуется недостатком увлажнения (коэффициент увлажнения составляет 0.4−0.5), жарким и сухим летом и умеренной холодной малоснежной зимой (средняя температура воздуха в январе минус 5−6 °С, в июле – плюс 24 °С) (Экологический атлас.., 2011).

В работе (Матишов Г. Г. и др., 2021б) выявлены внутривековые изменения климата и водности в Приазовье. Отмечено, что за 130 лет наблюдений основная доля суровых зим (более трети) пришлась на конец XIX – начало XX века, а теплых – на начало XXI века. Основываясь на гидрометеорологических данных 1884–2020 гг., авторы выделили три периода: условно холодный (многоводный; 1884–1942 гг.), переходный (1942–1985 гг.) с достаточно резкими колебаниями температур по годам и теплый (маловодный; 1986–2020 гг.).

Характер общей увлажненности в бассейнах рек оказывает основное влияние на величину водного стока, на что, в свою очередь, накладывает свой отпечаток интенсивность хозяйственной деятельности.

Зарегулирование Нижнего Дона началось в 1914 г. с постройкой Кочетовского гидроузла. Сегодня сеть гидротехнических сооружений состоит из трех низконапорных гидроузлов (Кочетовский, Константиновский и Николаевский), ведется строительство четвертого – Багаевского. На р. Маныч (левый приток Дона) построены три водохранилища: Усть-Манычское (1936 г.), Пролетарское (1936 г.) и Веселовское (1941 г.) как начало Манычского водного пути для соединения Каспийского и Азовского морей (проект не был закончен). К 1953 г. построено, наполнено и введено в эксплуатацию крупнейшее на Дону Цимлянское водохранилище (309 км от устья) для межгодового и сезонного регулирования стока. В это же время для сельскохозяйственных целей построен Донской магистральный канал. В 1948 г. введен в эксплуатацию Невиномысский канал, по которому вода р. Кубань самотеком поступает в р. Егорлык и далее в р. Маныч. В 1967 г. вода р. Кубань по Большому ставропольскому каналу стала поступать в р. Калаус и далее в р. Маныч.

На протяжении последних 80 лет (1940–2021 гг.) наблюдалось несколько хорошо выраженных циклов колебания водности Дона – солености Азовского моря с интервалом 20–40 лет. Кратковременные максимумы наблюдались в 1994 г. (35.6 км^3/год), в 2004–2006 гг. (24.4; 27.3; 25.5 км^3/год, соответственно) (Матишов и др., 2021б). Наименьших значений сток р. Дон достиг в 1972–1976 гг. (9.5 км^3 в 1972 г.). Основными причинами снижения стока реки в этот и последующие годы являлись: орошение, водоснабжение, дополнительное испарение с водохранилищ, организация прудов. В период 1977–2006 гг. донской сток в среднем составлял 23 км^3/год при колебаниях от 13.8 (1984 г.) до 38.3 км^3 (1979 г.) (Сорокина и др., 2006). В 2007 г. начался очередной маловодный период, который продолжается по настоящее время. Весной 2018 г. наблюдалось интенсивное весеннее половодье и годовой сток превысил 23 км^3, но средний за период 2007–2021 гг. годовой сток (менее 15 км^3) является минимальным по сравнению с предшествующими периодами маловодья в XX веке.

До зарегулирования реки Дон сток в течение года был распределен неравномерно, с большим пиком весной (величина весеннего стока составляла 78 % годового) и довольно устойчивой маловодной меженью в остальные сезоны годы. После строительства Цимлянского водохранилища на Дону значительно уменьшился сток половодья (в апреле–мае), перестала заливаться пойма реки. В остальную часть года сток увеличился.

Можно констатировать, что в настоящее время Приазовье находится в условиях аридизации климата: дефицита водных ресурсов, отсутствия половодья, исключительно большого испарения (Матишов, 2016; Панов и др., 2006). В текущий период маловодья увеличилась доля подземного питания рек, вызванного общим ростом увлажнения Восточно-Европейской равнины (Джамалов и др., 2013; Blöschl et al., 2017). Эти процессы тесно связаны с изменением циркуляции атмосферы, увеличением

числа оттепелей и снижением глубины промерзания почвы, что способствует пополнению запасов грунтовых вод в зимний период. Отсутствие половодного дренажа рек приводит в последнее время к заилению русел, а также многочисленных проток и гирл дельты Дона. Устойчивые антициклоны и сильные восточные ветры (суховеи) вызывают летнюю засуху (вплоть до категории опасного явления), а также пыльные бури (Сорокина и др., 2021).

Более 70 % водосбора Нижнего Дона распахано. Значительные площади в низовьях Дона и Маныча занимают пруды рыбоводных хозяйств и рисовые чеки. Являясь коренным образом преобразованными человеком во второй половине XX века, дельта Дона и система водоемов Кумо-Манычской впадины быстро реагируют на климатические изменения. В обоих случаях в последние десятилетия фиксируется осолонение вод, общей причиной которого является снижение водности Дона, но конкретные механизмы этих изменений существенно отличаются. Анализ динамики термохалинных характеристик Азовского моря (Бердников и др., 2022) подтверждает долговременную тенденцию к осолонению, средние значения солености в 2007–2021 гг. превышают 14 ‰, тогда как в предшествующий маловодный период в 1970-х гг. составляли 13.3 ‰. Гидрологические процессы все больше стали приобретать явно аномальные формы, происходит осолонение Таганрогского залива, обмеление русла Дона, экстремальные сгоны воды на взморье и зарастание авандельты, миграция представителей азовоморской фауны в дельту Дона и др. (Матишов и др., 2017). Почвенный покров дельты Дона подвержен влиянию животноводства, рекреационного строительства, абразии русловых берегов при проходе судов большого тоннажа. Влияние антропогенных факторов на долину Маныча заключается в интенсификации пастбищной нагрузки, использовании минерализованных вод для орошения, расширении площадей агроландшафтов за счет залежных земель.

Материалы и методы

Проведение экспедиционных мониторинговых исследований наземных и водных экосистем юга России является приоритетной задачей в деятельности ЮНЦ РАН, начиная с 2002 г. и по сей день. Полевые исследования позволили собрать данные (базы данных – БД), с помощью которых может быть решен широкий спектр фундаментальных и прикладных задач, связанных с функционированием и эксплуатацией исследуемых природных систем. Примером такой БД является пополняемая интернет-версия Справочника «Органическое вещество Азовского моря и прилегающих районов Черного моря» (http://atlas.ssc-ras.ru/sitemap-organic.html). Регулярный мониторинг системы водоемов Кумо-Манычской впадины ведется с 2008 г. Подробно описаны изменения гидролого-гидрохимического режима, гидробиологических сообществ оз. Маныч-Гудило и прилегающих водоемов, состояние почв, растительного и животного мира (Матишов, Бердников, 2018).

Данное исследование выполнено на основе всех полученных ранее научных знаний, в том числе результатов проекта РГО «Интегральная оценка эколого-геохимического состояния аквальных систем устьевой области Дона» (грант РФФИ 13-05-41528 РГО_а).

В работе использована БД гидролого-гидрохимических показателей ЮНЦ РАН для определения изменений основных свойств поверхностных вод. Закономерности происхождения вод в дельте Дона установлены на основании анализа 54-х гидрохимических проб, отобранных в водотоках дельты Дона при максимальном и минимальном уровнях воды, а также из водоносных горизонтов скважин, пробуренных на южном коренном берегу Дона (пос. Кагальник, Займо-Обрыв) и из магистрального водопровода в г. Азов в период с 20 ноября 2020 г. по 8 марта 2021 г. Гидрохимический режим водоемов долины Западного Маныча описан по результатам комплексной экспедиции в июле–августе 2021 г.

Материал для исследования уровня накопления органического углерода в водах Нижнего Дона получен в ходе экспедиций в мае и сентябре 2018 г. с отбором проб с борта моторной лодки. Измерения проводили в стационарной лаборатории ЮНЦ РАН. Определение растворенного органического вещества (РОВ) выполняли методом высокотемпературного сжигания (800 °C) в атмосфере чистого кислорода и с применением катализатора – оксида церия. Образующийся диоксид углерода определяли методом оптико-акустической регистрации в ИК-области с помощью прибора Multi-N/C 3100 (Германия). Результат измерений РОВ выражали по общепринятому химическому параметру – органическому углероду ($C_{орг}$).

Для оценки динамики почвенных показателей прибрежной и островной территорий дельты Дона и долины Маныча использовали результаты мониторинговых исследований ЮНЦ РАН с 2009–2020 гг. на ключевых участках (в прибрежной зоне озера Маныч-Гудило выбраны 10 ключевых участков, в дельте Дона – 4) (рисунок 2). Использованы данные почвенной съемки ЮжНИИГПИРОЗЕМА 1987 г. для сравнения с данными полевых наблюдений ЮНЦ РАН за период 2009–2014 гг. Морфологическое описание почв выполняли по общепринятым методикам (Александрова и др., 1986; Кауричев, 1980; Розанов, 2004). В лабораторных условиях в почвенных образцах определяли содержание гумуса методом Тюрина в модификации Орлова и Гриндель (Орлов, Гришина, 1981), карбонатов ($CaCO_3$), плотность, содержание легкорастворимых солей, pH, гранулометрический состав стандартными методиками (Аринушкина, 1970; Кауричев, 1980).

Специфика выбора почвенных полигонов для многокомпонентного мониторинга обусловлена наличием как «эталонных» (Государственный природный биосферный заповедник федерального значения «Ростовский» с 1995 г. и Природный парк «Донской» с 2005 г.), так и антропогенно преобразованных ландшафтов. За последние 30 лет оба района претерпели принципиальное изменение общей структуры природопользования и специфики экономической деятельности.

Рис. 2 – Картосхема экспедиционных работ ЮНЦ РАН в прибрежной и островной частях дельты Дона (**а**) и долины Маныча (**б**). Цифрами обозначены в дельте Дона (**а**): 1 – протока Кутерьма, 2 – ерик Церковный, 3 – протока Бирючье, 4 – о. Джулька; в районе Пролетарского водохранилища (**б**): 1 – о-в Горелый, 2 – о-в Водный, 3 – Пионерлагерь, 4 – п-ов Водомерка, 5 – оз. Грузское, 6 – п-ов Балалайка, 7 – п. Маныч, 8 – совхоз Маныч, 9 – Камышевка, 10 – оз. Лопуховатое. Точками синего цвета обозначены полнопрофильные почвенные разрезы, красного – прикопки и полуямы

Оценка изменений площади водного зеркала в дельте Дона и в водоемах Кумо-Манычской впадины выполнена с использованием данных ДЗЗ в ArcGIS. При отборе спутниковых снимков за период 1985–2021 гг. учитывали критерии однотипности (месяц года и среднемесячный расход воды (Q) Дона в замыкающем створе – ст. Раздорской), а также отсутствие облачности.

Для получения маски воды использовали индекс NDWI (Normalized Difference Water Index) (Xu, 2006), который основан на спектральных свойствах водной поверхности – высокого отражения в зеленом (Green) и низкого в ближнем инфракрасном (NIR) диапазонах: NDWI = (Green – NIR) / (Green + NIR).

Для спутниковых снимков Landsat 5 и Landsat 8 (с 2013 г.) использовали каналы Green и NIR, наиболее близкие по длине волны: 0.52–0.60 (Landsat 5) и 0.525–0.600 (Landsat 8); 0.76–0.90 (Landsat 5) и 0.845–0.885 (Landsat 8), соответственно по (https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites).

Для дельты Дона анализировали снимки 08.08.1985 г. (Landsat 5, Q – 559 м^3/с) и 02.08.2021 г. (Landsat 8, Q – 310 м^3/с). Так как Пролетарское водохранилище (включая оз. Маныч-Гудило) имеет сложную вытянутую форму, в одном случае использовали снимки за схожие даты для соседних сцен: 08.08.1985 г. (Landsat 5), 08.09.2022 и 09.09.2022 г. (Landsat 8). За границу между восточной частью Пролетарского водохранилища и оз. Маныч-Гудило принимали дамбу водохранилища, а за контур озера – наибольшее из рассмотренных на использованных спутниковых съемках непрерывное водное зеркало озера. Для дельты Дона, как переходной зоны между Нижним Доном и Таганрогским заливом, границами являлись меридианы 39°12″ в. д. (морская граница между населенными пунктами Стефанидинодар и Морской Чулек) и 39°40″ в. д. (около 2 км выше ответвления Мертвого Донца от основного русла Дона), а также широты 47°1″ с. ш. и 47°18″ с. ш.

Результаты и обсуждение

Динамика площадей водной поверхности в дельте Дона и долине Маныча

Современное маловодье на Нижнем Дону (Матишов, Григоренко, 2017), а также хозяйственная деятельность, связанная с рыборазведением и сельским хозяйством, привели к изменению площадей водной поверхности русел, проток и прудов дельты Дона и водоемов Кумо-Манычской впадины, в частности Пролетарского водохранилища (включая оз. Маныч-Гудило).

Сравнение результатов дешифрирования спутниковых снимков для территории дельты Дона за август – начало сентября 1985 г. и 2021 г. показало общее сокращение площадей, занятых водой в среднем на 15 % (с 183.1 до 156.3 км^2) (рисунок 3а). Причем площадь русел и проток в дельте сократилась на 12 %, рыборазводных прудов и других водных объектов – на 66 %, площадей, занятых водой на морской границе дельты Дона, – на 1 %. Наибольшие изменения площади водной поверхности в дельте Дона связаны с хозяйственной деятельностью, частично опосредованной сокращением водности Дона.

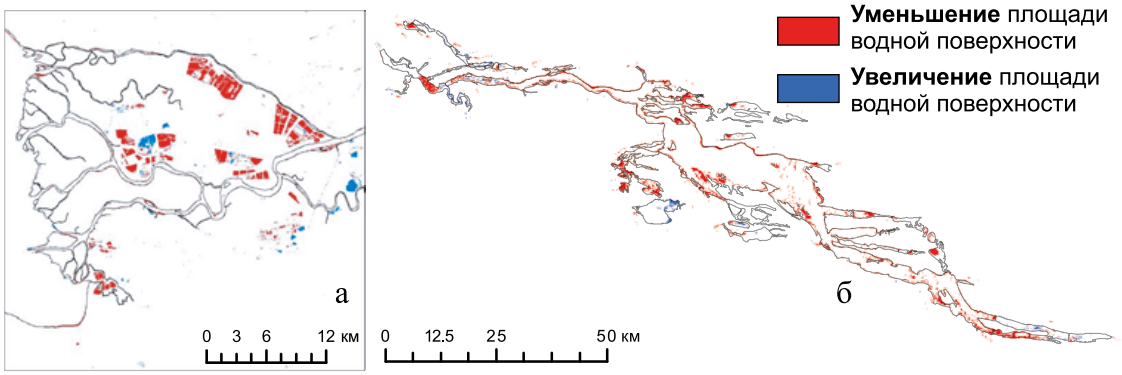

Рис. 3 – Изменение площади водной поверхности в дельте Дона и Пролетарском водохранилище за период 1985–2022 гг. Синим цветом показано увеличение площади, красным – уменьшение

Общая площадь водной поверхности Пролетарского водохранилища и ближайших водоемов (всего рассмотрено 12 озер) сократилась за аналогичный период (1985–2022 гг. в августе – начале сентября) на 16 % (с 795.4 до 668 км^2) (рисунок 3б). Мы зафиксировали практически полное осушение таких озер как Малое Яшалтинское, Крутянское, Хагин-Сала, Грузское, Лебяжье, Кущеватое, а также значительное сокращение (порядка 80–90 %) водных площадей озер Арал-Эмке, Лопуховатое и Царык. Менее значительное сокращение водной поверхности характерно для оз. Соленое (на 33 %) и самого большого из рассмотренных озер – оз. Маныч-Гудило (15 %). Площадь озер Большое Яшалтинское и Джама увеличилась на 13 и 9 %, соответственно.

Следует отметить, что водоемы Кумо-Манычской впадины имеют пульсирующий характер изменения границ водной поверхности, что зависит от климатических

условий конкретного года или сезона. Как известно (например, McClain, Boyer, 2003), вода является важным реагентом, катализатором или средой для многих реакций; таким образом, приход и уход воды обычно приводит к активизации и деактивации биогеохимических процессов. В целом, за рассматриваемый период времени общая поверхность водного зеркала сократилась в обоих рассматриваемых районах, соответственно увеличилась площадь осушки. Следует ли ожидать замедления биогеохимических процессов на этой территории – пока вопрос, так как отсутствие гидрологического потока одного типа может смениться другим типом.

Процессы в дельте Дона, связанные с динамикой вод

На фоне современной пониженной водности реки Дон определяющее влияние на гидрологический режим дельты и взморья оказывают сгонно-нагонные явления. Повторяемость этих явлений определяется повторяемостью господствующих ветров северо-восточных и юго-западных румбов, направление которых совпадает с осью Таганрогского залива.

Действие ветров восточного направления («верховка») приводит к сгону воды. В дельте формируется стоково-сгонный уровень воды, нередко опускающийся ниже критических отметок. Действие ветров западного направления («низовка») приводит к нагону воды из Таганрогского залива. Нагонные длинные волны часто проникают в русла дельты и выше по реке на значительные расстояния, так как сопротивление, которое оказывают им прямые положительные волны попуска, менее значительно. Катастрофические наводнения в Таганрогском заливе и дельте Дона в 2013 и 2014 гг. подробно документированы в работах ЮНЦ РАН (Матишов и др., 2014а, 2014б; Матишов, Бердников, 2015; Матишов, 2015а, 2015б). В результате сильных нагонов в дельте Дона были отмечены соленые воды (Матишов и др., 2017; Клещенков, Московец, 2021).

В работах (Пономаренко и др., 2012; Сорокина и др., 2020) выполнена классификация сгонно-нагонных явлений в период 2007–2010 гг. и 2015–2017 гг. С учетом результатов авторов делаем выводы о том, что общее количество сильных и экстремальных сгонов превышало количество таких же нагонов в 2 раза, но с учетом умеренной и обычной низовок (т.е. ситуаций, когда уровень повышается незначительно до отметок 0.5–0.8 м БС) количество нагонов превысило количество сгонов в период 2015–2019 гг., за исключением разве что 2018 г. В этом году доминировали ветра восточных румбов, что нередко приводило к сильным сгонам воды в дельте Дона, но, несмотря на относительно малое количество сильных нагонов, зафиксирован максимальный уровень (1.68 м БС) за 5 рассмотренных лет (21 марта 2018 г.).

Таким образом, в дельте Дона динамика вод в основном определяется речным стоком и сгонно-нагонными явлениями, причем значимость последних существенно возросла в современный маловодный период. Дельта Дона как объект исследования полностью соответствует понятию переходных зон и наземно-водных границ, периодически затапливаемых и осушающихся территорий. Понимание механизмов движения воды в дельте (гидрологических путей) способствует пониманию механизмов

биогеохимических процессов, контроля биогеохимических «горячих точек» и «горячих моментов», так как в этой области при взаимодействии речных, морских и грунтовых вод пути разных течений пересекаются и сталкиваются с субстратом, содержащим дополнительные реагенты.

Современные изменения термохалинной структуры вод и аномалии гидрохимического режима в дельте Дона

Маловодье привело к значительному осолонению устьевой области Дона. Доля пресных речных вод в Таганрогском заливе понизилась, ее заместили соленые воды с юга Азовского моря. В результате, в течение всего года на разрезе Очаковская коса – Таганрог наблюдается соленость 4–11 ‰, что в несколько раз выше среднемноголетних (1.2–1.6 ‰) значений (Гидрометеорология …, 1991). Отмечаются явления стремительных адвекций черноморских вод в Азовское море, при этом происходит заполнение дельты Дона водами с соленостью до 10 ‰ и гидрохимический барьер с перепадом солености более 5–6 ‰ смещается на 20–40 км вверх по дельте Дона (Матишов, 2021б). После ослабевания ветрового течения на устьевое взморье реки возвращается слабосолоноватая (2–4 ‰) и пресная (речная) вода (1–2 ‰). Кроме нетипичной солености имеют место инверсии стратификации вод, внедрения в солоноватые воды линз пресной воды (Матишов, Григоренко, 2017).

Слабосолоноватые воды (2–4 ‰) характерны для дельты Дона при нагонах, вызываемых умеренными и сильными ветрами (8–12 м/с) юго-западных румбов. Уровень воды может повышаться на 0.2–1.5 м. По мере ослабевания нагонного ветра и понижения уровня может формироваться стратификация в виде скачка солености в придонном слое.

Солоноватые воды (4–8 ‰) ранее (до 2014 г.) не отмечались в аванделыте и на устьевом взморье. Обычно воды с указанной величиной солености располагаются в Таганрогском заливе, на 90 км западнее от морского края дельты, на разрезе кос Сазальницкая – Кривая (Матишов, 2016). В 2020 г. инструментально зафиксированы высокосоловатые (морские) воды (8–18 ‰) в аваделыте Дона при умеренном (7 м/с) восточном ветре.

Различные типы стратификации вод в дельте Дона, характерные для современных маловодных условий, описаны в работе (Матишов, Григоренко, 2017). При отсутствии колебаний уровня вод дельта и взморье заполнены пресной водой (до 1 ‰). При слабых восточных ветрах и понижении уровня воды на 0.2–0.4 м (ситуация сгона) в дельте и на взморье распространяется пресная (речная) вода с соленостью до 2 ‰. При максимальных подъемах уровня речная вода замещается перемешанной (речной и морской) водой, а затем – морской (до 10 ‰). Нередко наблюдается двухслойная стратификация, с более соленой (3.0–5.0 ‰) придонной водой. Отдельно выделяется тип стратификации, при котором более соленым, но более теплым, является поверхностный слой. Плотностная стратификация в этом случае обеспечивается холодным пресным речным стоком, который заполняет понижения дна дельты.

Наблюдения показывают, что в зимние месяцы 2017–2022 гг. в южных рукавах дельты Дона присутствуют более соленые воды (более 5 ‰), чем в другие сезоны. Продолжительность ярко выраженной аномалии является долговременной (порядка 500 часов). Характерными условиями, при которых растет соленость, являются низкие расходы Дона (300–350 $м^3$/с в ст. Раздорской) и понижение уровня воды в период сгонов. Феномен существования солоноватых (общее содержание солей 2 г/л и более) вод при понижении уровня водоема объясняется изоляцией проток заиленными мелководными порогами от основного русла Дона и заполнением минерализованным подземным стоком.

В дельте Дона грунтовые воды могут просачиваться из осадочных пластов коренного берега, а также течь с возвышающихся островов собственно дельты при сгонах воды. Ионный состав грунтовых вод существенно зависит от водоносного горизонта и состава дренируемых пород (Матишов и др., 2021а).

Анализ динамики гидрохимических показателей за 2018–2020 гг. показал, что главным индикатором вод в дельте Дона являются анионы: при заполнении водотоков морской водой в ее составе преобладают хлориды, грунтовой водой – сульфаты. Закономерности происхождения вод установлены на основании анализа 54-х гидрохимических проб, отобранных в водотоках дельты Дона при максимальном и минимальном уровнях воды, водоносных горизонтах скважин, пробуренных на южном коренном берегу Дона (пос. Кагальник, Займо-Обрыв). Отобрана вода из магистрального водопровода в г. Азов (Матишов, Григоренко, 2018; Матишов, Григоренко, 2021). Для речной воды характерна низкая минерализация (до 2 г/л), примерно равные доли сульфатов и гидрокарбонатов, хлоридов меньше всего (таблица 1). Для всех типов вод среди катионов характерно преобладание натрия и калия, при этом определяющими они не являются.

Подземное питание при нагонах воды в дельту становится неразличимо. В ситуации нагона морские воды проникают в дельту и смешиваются с пресной речной водой. Растет минерализация, и уже при ее значении 1 г/л доля хлоридов становится более 80 %. Максимум солености при таком гидрохимическом составе в дельте Дона достиг 8.1 г/л 14 февраля 2021 г.

Таблица 1 – Индикаторные показатели вод в дельте Дона

Тип вод	Преобладающий анион	Минерализация, г/л
Речная	SO_4^{2-}≈40 % HCO_3^{2-}≈40 %	0.6–2
Грунтовая	SO_4^{2-}>60 %	2–6
Морская	Cl^->80 %	1–8

Таким образом, уменьшение пресного стока Дона является основной причиной увеличения минерализации вод в его дельте. На этом фоне различные факторы, связанные с динамикой вод (в первую очередь со сгонно-нагонными явлениями), создают различные по времени и распространению в пространстве аномалии (многие

из которых можно считать «горячими точками» и «горячими моментами»), смещение гидрохимических и геохимических барьеров в сторону реки при нагонах, увеличение доли минерализованного подземного стока при сгонах. Эпизоды такого рода явлений требуют специального изучения.

Минерализация вод бассейна Западного Маныча

Система пресных водохранилищ Западного Маныча является искусственной. Климатическая засуха сказалась на ней катастрофически. Прогрессирующее осолонение оз. Маныч-Гудило с конца 1960-х гг. согласуется с общим понижением водности в бассейне Дона. Веселовское водохранилище питается водами Кубани, поступающими в рамках межбассейновой переброски вод по Невиномысскому каналу и Большому Егорлыку, а также водами Дона через Донской Магистральный канал. Кубанские воды распресняют западный отсек Пролетарского водохранилища через Средний Егорлык. Водопропускные сооружения Новоманычской дамбы пропускают минимальные объемы пресной воды в восточный отсек Пролетарского водохранилища, распресняя всего 10–15 км русла. Пролетарская ветвь Донского магистрального канала в текущий, маловодный, период преимущественно пустует.

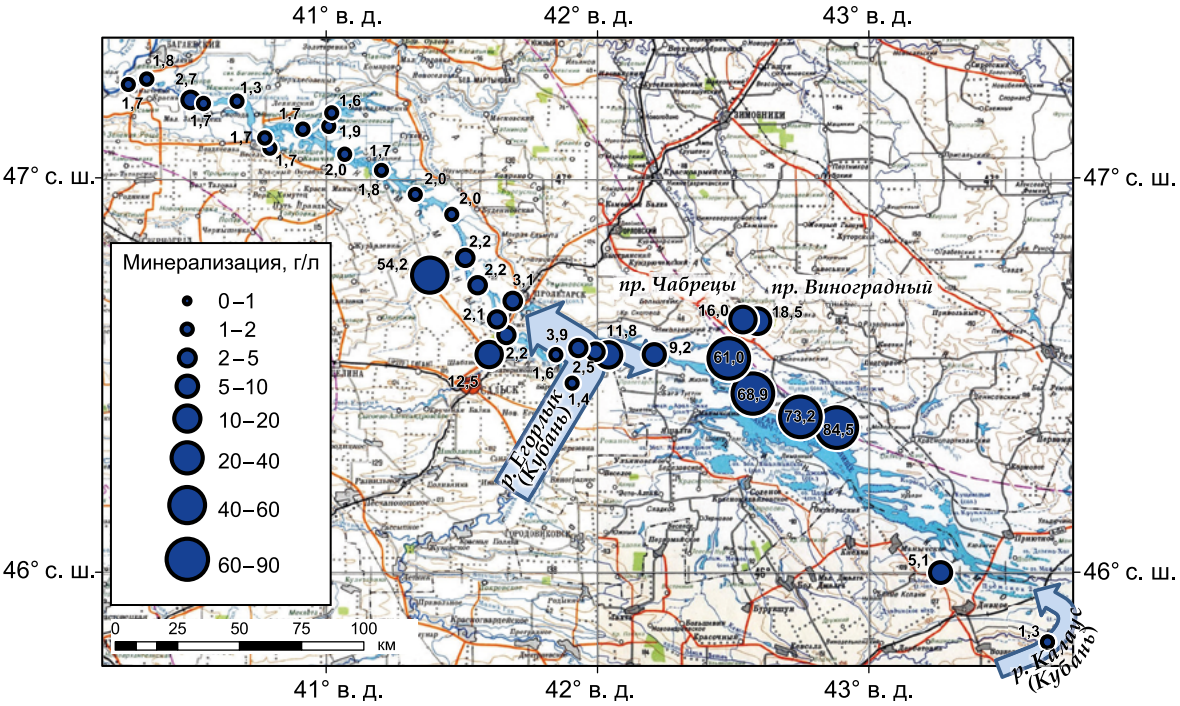

Рисунок 4 – Общая минерализация вод системы водоемов Западного Маныча в июле–августе 2021 г.

Минерализация поверхности водоемов Кумо-Манычской впадины в июле–августе 2021 г. представлена на рисунке 4. Наиболее пресными (менее 1.3–1.6 г/л) являются притоки Западного Маныча, несущие кубанские и донские воды (р. Егорлык,

р. Калаус). Устье собственно Маныча, Веселовское водохранилище, а также верхний бьеф Пролетарского водохранилища, имеют минерализацию 1.7–3.1 г/л. Достаточно высокие значения получены для прудов Чабрецы и Виноградный (16 и 18.5 г/л, соответственно). Озеро Маныч-Гудило имеет максимальную минерализацию 84.5 г/л. На других станциях озера значения меньше – 61–73.4 г/л.

Таким образом, наибольшие градиенты общей минерализации вод в системе Кумо-Манычских водоемов наблюдаются в районах впадения пресных притоков (р. Егорлык, р. Калаус), а также между западной частью Пролетарского водохранилища и собственно оз. Маныч-Гудило. Эти районы требуют более детального изучения, они могут быть потенциальными биогеохимическими «горячими точками», так как здесь смешиваются пресные и соленые воды, встречаются гидрологические потоки с контрастным химическим составом.

Содержание растворенного органического вещества в водах Нижнего Дона и Маныча

Рассмотрен сезонный режим растворенного органического вещества (по $C_{орг}$), характеризующего интенсивность процессов первичного продуцирования в водах Дона. Концентрация $C_{орг}$ изменялась в мае 2018 г. в диапазоне 6.7–10.7, в сентябре – 9.8–12.5 мг С/л. Такие результаты позволяют отнести воды Цимлянского водохранилища и воды р. Дон в большинстве случаев к эвтрофному типу, за исключением нескольких измерений, выполненных весной 2018 г. (концентрация $C_{орг}$ – менее 8.0 мг С/л). Эвтрофный тип вод свидетельствует о том, что уровень первичной продукции как Цимлянского водохранилища, так и южной части бассейна Дона, не снизил высокой трофности в отличие от организмов-консументов.

В целом, сравнительно низкие концентрации органического углерода в мае свидетельствуют о заметном разбавлении вод Цимлянского водохранилища весенним половодьем с поступлением вод зимнего снегового питания. Большой объем вод водохранилища (чаша – 23.9 км^3 и около 15 км^3 – по наполнению) довольно медленно «промывался» водами Среднего Дона, уже восстановившимися вследствие активной продукции фитопланктона. Именно по этой причине концентрация $C_{орг}$ в районе Калача-на-Дону (в среднем 9.4 мг С/л) оказалась выше, чем в самом водохранилище, где концентрация $C_{орг}$ снизилась (в среднем до 7.7 мг С/л). В осенний период в районе Калача-на-Дону содержание $C_{орг}$ заметно повысилось – до 12.4 мг С/л, а в самом водохранилище – до 10.2 мг С/л, при этом соотношение между верхней частью водохранилища (Калач-на-Дону) и его срединной частью сохранилось достаточно сходным.

Важно отметить, что вариации уровней концентрации $C_{орг}$ на разных участках русла Дона и в различные временные периоды являются следствием главной гидрологической особенности – преимущественно снегового питания Дона. Роль дождевых выпадений заметно ниже. По нашим данным, концентрации $C_{орг}$ в пробах снега и дождей варьируют в небольшом диапазоне, в пределе от 1 до 3 мг С/л.

Концентрации $C_{орг}$ в водах Дона ниже Цимлянского водохранилища становятся более высокими благодаря русловому течению Дона с интенсивным перемешиванием вод, повышающим скорость продукции микроводорослей и бактериальное перерабатывание отмерших организмов, и поступлению вод притоков Дона и родников с высокой продукцией биоты.

В период экспедиций 2014–2018 гг., по данным (Саяпин и др., 2018), концентрация $C_{орг}$ в водах низовьев р. Маныч, в Веселовском и нижней части Пролетарского водохранилищ изменялась в пределах 8.5–12.1 мг С/л, что характерно для вод Нижнего Дона. При этом минерализация вод на этих участках сравнительно невысока (1–3 г/л). Более высокое содержание $C_{орг}$ (17.7 г/л) отмечено в нижней части Пролетарского водохранилища, в пруде Виноградный, где минерализация вод повышена.

В водах оз. Маныч-Гудило, отличающихся высоким содержанием солей (40–50 г/л), а также в многочисленных мелких озерах долины Маныча, повсеместно отмечалось высокое накопление РОВ с концентрацией порядка 50 мг С/л, что, как правило, не встречается в водоемах южной части ЕТР (например, Сорокина, Герасюк, 2018). Важно отметить, что корреляция между $C_{орг}$ и биогенными элементами в основном сохраняется в водоемах манычской группы, что свидетельствует об активности продукционно-деструкционных процессов, возможно, с измененными скоростями продукции и деструкции.

Высокую концентрацию $C_{орг}$ в манычских водах можно объяснить пониженной активностью бактериальной деструкции генерируемого в водной толще органического вещества и естественным его накоплением. Явление накопления $C_{орг}$ в водной толще высокоминерализованных вод характерно не только для вод Маныча (Саяпин и др., 2018). В результате исследований биохимических процессов в водоемах с высокой соленостью, выполненных сотрудниками Зоологического института РАН (г. Санкт-Петербург), установлено, что при возрастании солености выше 40 ‰ существенно изменяется состояние структуры и функционирования водных экосистем, в том числе автотрофных организмов (например, Голубков, 2012).

Таким образом, в водоемах долины Маныча происходит накопление органического вещества в воде благодаря тому, что в условиях повышенной минерализации вод понижается активность бактериальной деструкции генерируемого в водной толще органического вещества на фоне приемлемых условий его продуцирования.

Динамика основных свойств почвенного покрова дельты Дона и долины Маныча

Почвенный покров исследуемых территорий отличается пространственной неоднородностью, что связано с естественными условиями развития почвообразовательных процессов, а также с антропогенной деятельностью как в водных, так и в наземных, частях природно-территориальных комплексов. Ведущую роль играет сложный микрорельеф, различный характер увлажнения склонов и западин, повышенная минерализация грунтовых вод, а также прямое антропогенное воздействие.

На сегодняшний день, при продолжающемся маловодье на Нижнем Дону, отмечена тенденция к существенному изменению строения верхней части профиля аллювиальных почв дельты реки. Паводковые воды практически прекратили, либо существенно уменьшили, промывку почвы от легкорастворимых солей; в почвах происходит опесчанивание верхней части профиля, что вызывает потерю гумуса в результате выноса илистой фракции в водотоки по причине сгонно-нагонных явлений в сочетании с эоловым фактором.

Уплотнение верхних почвенных горизонтов отмечено в центральных частях островов дельты Дона. Оно характерно для ареалов сильных ландшафтных пожаров вблизи селитебных и сельскохозяйственных зон дельты (например, в районе южной части ерика Церковный). В то время как почвы природных «эталонных» ландшафтов имеют низкую степень уплотнения (0.46–0.54 г/см^3), все почвы, примыкающие к селитебным зонам, характеризуются переуплотнением (свыше 1.2 г/см^3). Переуплотнение локально отмечено на берегах мелких водотоков в микропонижениях рельефа, редко заливаемых водами.

Для всех изученных аллювиальных почв величина сухого остатка не превышала 0.5 %, что позволяет сделать вывод об их незасоленности. Исключение составляют почвы микропонижений островов между рукавом Мокрая Каланча и гирлом Егурча, а также ериком Церковный (величина сухого остатка составила 0.55–0.6 %). Нередко после кратковременного подъема уровня воды в малых водотоках (в том числе в период нагонов) на поверхности отмечается коркообразование, которое значительно ухудшает инфильтрацию по профилю, а также формирует очаги локального «оглеения» в почвенной толще. Это способствует формированию ареалов локально переувлажненных и засоленных почв. Следует отметить, что ранее (Смирнов, 1968; Добровольский, 2005) не было отмечено тенденции к засолению верхних горизонтов почв прибрежной и островной частей дельты Дона (в особенности побережья крупной протоки Кутерьма).

Зоны наибольшей дегумификации почв дельты Дона связаны с непосредственным развитием сельского хозяйства (скотоводства), процессов абразии в местах интенсивного судоходства и плоскостного смыва. Содержание гумуса в верхних горизонтах не превышает 2.59–3.36 %, вниз по профилю отмечено постепенное уменьшение до 0.79–1.02 %.

Таким образом, трансформация почвенного покрова дельты Дона (в особенности прибрежной и островной частей) является следствием зарегулирования стока реки, ситуация усугубляется уже достаточно длительным (16 лет) маловодьем на юге ЕТР, вызвана уменьшением объемов пресного речного стока крупных и, в особенности, мелких рукавов дельты, сокращением промывки верхних почвенных горизонтов от легкорастворимых солей пресными водами половодья, увеличением доли минерализованного подземного стока в период сгонов воды, увеличением солености вод, заливающих дельту в результате нагонов из Таганрогского залива.

В долине Маныча на фоне приуроченных к каштановым почвам степных ценозов выделяются, с одной стороны, пятна влаголюбивой растительности

микро- и мезопонижений на лугово-каштановых почвах, а с другой стороны – пятна полупустынной растительности на каштановых солонцеватых почвах и солонцах. Основной тип – каштановые почвы. Встречаются подтипы каштановых, темно-каштановых, светло-каштановых почв, а также тип лугово-каштановых (Ильина и др., 2014; Ильина, Сушко, 2018).

На территории района исследований характер хозяйственной деятельности претерпел коренные изменения, связанные со спецификой социально-экономического развития региона в конце XX – начале XXI века. Современный этап развития хозяйственной деятельности характеризуется увеличением (по сравнению с 1990–2000 гг.) объемов производства сельскохозяйственной продукции, как крупными хозяйствами, так и небольшими землепользователями. Пастбищное животноводство, отчасти земледелие, в настоящий момент является ключевым фактором развития процессов деградации почв.

Усиление негативных процессов в почвах за последние 30 лет подтверждают результаты сравнения полевых мониторинговых данных ЮНЦ РАН с данными съемки ЮжНИИГИПРОЗЕМа (1987 г). Можно выделить наиболее кризисные районы, сформированные в сложившихся условиях землепользования (таблица 2, рисунок 2). К ним относятся западный берег оз. Круглое, а также восточный и юго-восточный районы полигона многолетнего мониторинга ЮНЦ РАН (оз. Грузское, свх. Маныч, п-ов Водомерка), где формируются ареалы почвенных комплексов с сильной и очень сильной степенью деградации. Это проявляется в уменьшении (в ряде случаем более, чем в два раза) интегральных показателей почвенного плодородия (содержания гумуса, мощности гумусового горизонта) и росте степени смытости почв, переуплотнения верхних почвенных горизонтов и увеличения содержания сухого остатка. Повсеместно (за исключением заповедных участков) возросла степень пастбищной нагрузки, в некоторых случаях сенокосные угодья переведены в разряд пастбищ.

На обследованных территориях заповедной зоны долговременное (1987–2014 гг.) изменение почвенных свойств незначительно, можно говорить о стабилизации почвенных параметров, улучшении свойств почв и устойчивом функционировании заповедных ландшафтов.

Таким образом, в почвах долины Маныча развиваются такие негативные процессы, как дегумификация, переуплотнение, слитизация, засоление и дефляция. Происходит увеличение доли засоленных почв в комплексах побережий пересыхающих гипергалинных озер. Сильно деградированные почвы приурочены к местам интенсивной антропогенной нагрузки, склоновым агроландшафтам. Негативные процессы формируются в условиях современного маловодья на юге ЕТР, развития процессов опустынивания и ветровой эрозии, сокращения площади ирригационных прудов, возникших после преобразования сети Манычских водохранилищ, повышения общей минерализации водоемов и вод, используемых для орошения, перекрытия земляными дамбами крупных балок, являющихся временными водотоками в весенний сезон.

Таблица 2 – Сравнительная характеристика основных почвенных показателей долины Маныча

№	Название	Содержание гумуса, %		Мощность горизонта А, см		Величина плотного остатка, %		Степень смытости		Тип природопользования	
		1987	2014	1987	2014	1987	2014	1987	2014	1987	2014
1	о. Горелый	3.2	3.3	47	48	0.09	0.09	Слабая	Слабая	Отгонные пастбища	Заповедный (с 1995)
2	о. Водный	2.7	3.3	39	42	0.17	0.12	Слабая	Слабая	Отгонные пастбища	Заповедный (РГПБЗ с 1995)
3	Пионер-лагерь	2.2	2.1	41	41	0.21	0.23	Средняя	Средняя	Рекреационная зона	Буферная зона заповедника (РГПБЗ с 2005)
4	п-ов Водомерка	2.3	0.8	34	20	0.24	0.53	Средняя	Очень сильная	Пастбище, слабая степень нагрузки	Пастбище, сильная степень нагрузки
5	оз. Грузское	1.6	1.3	32	29	0.24	0.42	Сильная	Сильная	Пастбище, слабая степень нагрузки	Пастбище, сильная степень нагрузки
6	п-ов Балалайка	2.3	2.2	42	41	0.13	0.17	Средняя	Средняя	Пастбище, слабая степень нагрузки	Пастбище, слабая степень нагрузки
7	п. Маныч	2.3	1.9	42	34	0.21	0.23	Средняя	Сильная	Пастбище, умеренная степень нагрузки	Пастбище, сильная степень нагрузки
8	совх. Маныч	2.1	0.9	36	21	0.14	0.47	Средняя	Очень сильная	Пастбище, сильная степень нагрузки	Пастбище, очень сильная степень нагрузки
9	Камышевка	2.7	2.8	44	43	0.21	0.12	Слабая	Слабая	Сенокос	Пастбище, средняя степень нагрузки
10	оз. Лопуховатое	2.6	2.1	43	35	0.23	0.32	Слабая	Средняя	Пастбище, слабая степень нагрузки	Пастбище средняя степень нагрузки

Отметим, что почва, наряду с растительным покровом, является наиболее значимым биогеохимическим барьером. На ее границах с другими компонентами ландшафта резко изменяются условия миграции веществ, что часто приводит к накоплению или удалению химических элементов. Помимо территорий, непосредственно прилегающих к водным объектам, районы очагового пастбищного животноводства, наличия артезианских скважин, развития эрозионных и дефляционных процессов являются потенциальными «горячими точками». Так, при встрече грунтовых вод с корнями растений, происходит снижение концентрации нитратов, а также возрастание потребления кислорода, активности денитрифицирующих ферментов и числа бактерий. Процессы денитрификации характерны также для заболоченных мест и отдельных почвенных профилей, там, где грунтовые воды встречаются с органическим восстановленным субстратом.

Изменения в механическом составе почвы и ее естественном дренаже влияют на продолжительность и время насыщения почвы водой и накопление органического вещества, а также на распределение бескислородных зон в масштабах катены (10–100 м). В свою очередь, такие условия способствуют процессам денитрификации, а также косвенно влияют на доступность углерода и азота через их воздействие на тип растительного сообщества и микробную активность (Beauchamp et al., 1989; Svensson et al., 1991).

Заключение

Настоящее исследование характеризует дельту Дона и систему водоемов Западного Маныча как два ключевых объекта на юге России для изучения биогеохимических циклов элементов, главным образом углерода, в переходных зонах между сушей и водой (наземно-водных границах). Оба объекта исследований имеют как заповедную, так и антропогенно-преобразованную территорию, что дает возможность сравнивать ход биогеохимических процессов в разных условиях и устанавливать степень антропогенного влияния на них.

Для исследуемых территорий определены основные физико-географические процессы, позволяющие обсуждать различия в пространственных и временных масштабах поставки, переноса и трансформации органического вещества и связности водных и наземных экосистем.

Пульсирующий характер изменения границ водной поверхности исследуемых водоемов зависит от климатических условий конкретного года или сезона, приход и уход воды обычно приводит к активизации и деактивации биогеохимических процессов, так как вода является важным реагентом, катализатором или средой для многих реакций. Во время промежуточных засушливых периодов реагенты (например, азот и углерод) часто накапливаются в почвах, а затем атмосферные осадки, либо другие источники вод, стимулируют быструю минерализацию и поглощение этих элементов растениями.

Показано общее сокращение площади поверхности водного зеркала в среднем на 15–16 %. Следует ли ожидать замедления биогеохимических процессов на осушенной территории – остается вопросом, так как отсутствие гидрологического потока одного типа может смениться другим типом. Так, в дельте Дона существенно возросла роль сгонно-нагонных явлений, вызывающих различные по времени и распространению в пространстве аномалии (многие из которых можно считать «горячими точками» и «горячими моментами»), смещение гидрохимических и геохимических барьеров в сторону реки при нагонах, увеличение доли минерализованного подземного стока при сгонах. Эпизоды такого рода явлений требуют специального изучения.

Для системы водоемов Западного Маныча характерно наличие градиентов солености между его отдельными частями (западной частью Пролетарского водохранилища и собственно оз. Маныч-Гудило, а также в районах впадения пресных притоков,

р. Егорлык, р. Калаус). Как известно, высокие скорости биогеохимической обработки часто поддерживаются сходящимися гидрологическими путями, где каждый поток несет материалы, необходимые для реакции. Эти районы требуют более детального изучения, они могут быть потенциальными биогеохимическими «горячими точками», так как здесь смешиваются пресные и соленые воды, встречаются гидрологические потоки с контрастным химическим составом и сильно различающимися концентрациями органического вещества и взвешенных веществ.

В водоемах долины Маныча концентрации органического углерода повышены (до 50 г/л). Происходит накопление органического вещества в воде благодаря тому, что в условиях повышенной минерализации вод понижается активность бактериальной деструкции генерируемого в водной толще органического вещества на фоне приемлемых условий его продуцирования.

На основе анализа свойств почвенного покрова дельты Дона и долины Маныча за период с конца 1980-х до настоящего времени определены районы с разной степенью проявления почвообразовательных процессов, а также основные факторы (как природные, так и антропогенные), контролирующие эти процессы. Показана трансформация почвенного покрова дельты Дона: изменение строения верхней части профиля аллювиальных почв (опесчанивание, потеря гумуса), уплотнение верхних почвенных горизонтов, появление ареалов локально переувлажненных и засоленных почв. В почвах долины Маныча развиваются такие негативные процессы, как дегумификация, переуплотнение, слитизация, засоление и дефляция. Происходит увеличение доли засоленных почв в комплексах побережий пересыхающих гипергалинных озер. Сильно деградированные почвы приурочены к местам интенсивной антропогенной нагрузки, склоновым агроландшафтам.

Помимо территорий, непосредственно прилегающих к водным объектам, районы очагового пастбищного животноводства, наличия артезианских скважин, развития эрозионных и дефляционных процессов являются потенциальными «горячими точками», где резко изменяются условия миграции веществ, что часто приводит к накоплению или удалению химических элементов.

Изменения в механическом составе почвы и ее естественном дренаже влияют на продолжительность и время насыщения почвы водой и накопление органического вещества, а также на распределение бескислородных зон. В свою очередь такие условия способствуют процессам денитрификации, а также косвенно влияют на доступность углерода и азота через их воздействие на тип растительного сообщества и микробную активность. Отмеченные в данной работе тенденции изменения почвенного покрова могут свидетельствовать о характерных процессах, влияющих на круговорот элементов, в том числе углерода.

Потоки таких элементов как углерод и азот, а также скорость биогеохимического круговорота, часто изменчивы в пространстве и во времени. Территории периодически пересыхающих акваторий степной зоны России являются зонами повышенных потоков и скоростей реакции, где встречаются наземные и водные экосистемы. Эти территории перспективны в плане изучения углеродного цикла. Локализация и

количественная оценка их оборотоспособности в различных пространственных масштабах является важнейшей предпосылкой для прогнозирования развития водных систем в условиях изменения климата и землепользования, а также для уточнения стратегий устойчивого управления.

Благодарности. Публикация подготовлена в рамках выполнения темы НИР ГЗ ЮНЦ РАН «Изучение гидроклиматических особенностей периодически пересыхающих акваторий юга России в контексте глобального углеродного цикла» № госрегистрации 122103100027-3.

Список литературы

1. *Александрова Л. Н., Найденова О. А.* Лабораторно-практические занятия по почвоведению. Л.: Агропромиздат, 1986. 295 с.
2. *Аринушкина Е. В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
3. *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. С. 65–70. https://doi.org/10.31857/S2686739722030057.
4. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 5: Азовское море / Под ред. *Гоптарева Н. П.* и др. СПб.: Гидрометеоиздат, 1991. 234 с.
5. *Голубков М. С.* Первичная продукция планктона и деструкция органических веществ в соленых озерах Крымского полуострова // Биология внутренних вод. М.: Наука, 2012. № 4. С. 31–38.
6. *Джамалов Р. Г., Фролова Н. Л., Киреева М. Б.* Современные изменения водного режима рек в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 6. С. 544. https://doi.org/10.7868/S0321059613060047.
7. *Добровольский Г. В.* Почвы речных пойм центра русской равнины. 2-е изд.: перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, 2005. 268 с.
8. *Ильина Л. П., Ковда И. В., Невидомская Д. Г., Сушко К. С., Моргун Е. Г.* Особенности формирования, состав и свойства сухостепных солонцевато-слитых почвенных комплексов Долины Маныча // Вестник Южного научного центра. 2014. Т. 10. № 4. С. 61–72.
9. *Ильина Л. П., Сушко К. С.* Особенности формирования, состав и свойства сухостепных засоленных почвенных комплексов Долины Маныча // Труды Южного научного цента РАН. Т. VII: Природные и антропогенные факторы в трансформации экосистем Западного Маныча. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2018. С. 138–151.
10. *Кауричев И. С.* Практикум по почвоведению. М.: Колос, 1980. 280 с.
11. *Клещенков А. В., Московец А. Ю.* Интрузии соленых вод в дельту Дона: закономерности развития и последствия // Наука Юга России. 2021. Т. 17. № 3. С. 30–37.
12. *Корытный Л. М.* Бассейновая концепция в природопользовании. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2001. 163 с.
13. *Матишов Г. Г.* Керченский пролив и дельта Дона: безопасность коммуникаций и населения // Вестник Южного научного центра РАН. 2015. Т. 11. № 1. С. 6–15.
14. *Матишов Г. Г.* Климат, водные ресурсы и реконструкция гидротехнических сооружений с учетом интересов населения, рыболовства и сельского хозяйства, судоходства и

энергетики. Доклад на расширенном заседании Президиума ЮНЦ РАН (г. Ростов-на-Дону, 25 мая 2016 г.). Ростов-на-Дону: изд-во ЮНЦ РАН, 2016. 64 с.
15. *Матишов Г. Г.* Случаи экстремальной адвекции соленых вод в дельту Дона и льда в Керченский пролив // Доклады Академии наук. 2015. Т. 465. № 1. С. 99–103.
16. *Матишов Г. Г., Бердников С. В.* Экстремальное затопление дельты Дона весной 2013 г. // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2015. № 1. С. 111–118.
17. *Матишов Г. Г., Григоренко К. С.* Причины осолонения Таганрогского залива // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477. № 1. С. 92–96. https://doi.org/10.7868/S086956521731019X.
18. *Матишов Г. Г., Григоренко К. С., Булышева Н. И., Московец А. Ю.* Новые данные о роли подземных и черноморских вод в азово-донском бассейне в период маловодья // Наука юга России. 2021а Т. 17. № 2. С. 34–48.
19. *Матишов Г. Г., Григоренко К. С., Московец А. Ю.* Механизмы осолонения Таганрогского залива в условиях экстремально низкого стока Дона // Наука Юга России. 2017. Т. 13. № 1. С. 35–43.
20. *Матишов Г. Г., Дашкевич Л. В., Титов В. В., Кириллова Е. Э.* Анализ внутривековой природной изменчивости в Приазовье и на Нижнем Дону: причина маловодья // Наука юга России. 2021б. Т. 17. № 1. С. 13–23
21. *Матишов Г. Г., Чикин А. Л., Бердников С. В., Шевердяев И. В.* Экстремальное наводнение в дельте Дона (23–24 марта 2013 г.) и факторы, его определяющие // Доклады Академии наук. 2014а. Т. 455. № 3. С. 342.
22. *Матишов Г. Г., Чикин А. Л., Бердников С. В., Шевердяев И. В., Клещенков А. В., Кириллова Е. Э.* Экстремальное затопление дельты Дона весной 2013 г.: хронология, условия формирования и последствия // Вестник Южного научного центра РАН. 2014б. Т. 10. № 1. С. 17–24.
23. *Орлов Д. С., Гришина Л. А.* Практикум по биохимии гумуса. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1981. 271 с.
24. *Панов В. Д., Лурье П. М., Ларионов Ю. А.* Климат Ростовской области: вчера, сегодня, завтра. Ростов-на-Дону: Изд. ООО «Донской издательский дом», 2006. 488 с.
25. *Пономаренко Е. П., Сорокина В. В., Бирюков П. А.* Сгонно-нагонные явления в дельте реки Дон в период с 2007 г. по 2010 г. и их прогнозирование // Вестник южного научного центра РАН. 2012. Т. 8. № 1. С. 28–37.
26. *Розанов Б. Г.* Морфология почв: учебник для высшей школы. М.: Академический проект, 2004. 432 с.
27. *Саяпин В. В., Сойер В. Г., Милутка М. С., Клещенков А. В.* Продукционно-деструкционные процессы и трансформация органического вещества в планктонном сообществе оз. Маныч-Гудило / Труды Южного научного цента РАН. Т. VII: Природные и антропогенные факторы в трансформации экосистем Западного Маныча. 2018. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2018. С. 57–68.
28. *Смирнов Р. Н.* Почвенно-мелиоративные условия поймы и дельты нижнего течения реки Дон // Почвоведение. 1968. № 9. С. 82–91.
29. *Сорокина В. В., Герасюк В. С.* Вариации гидрохимических показателей в водном континууме Нижний Дон – Черное море // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. Вып. 3. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2018. С. 251–257. https://doi.org/10.23885/2500-395x-2018-1-3-251–257.
30. *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 РАН. 2006. Т. 2. № 2. С. 58–67.

31. *Сорокина В. В., Московец А. Ю., Клещенков А. В.* Экстремальные гидрологические явления в дельте Дона, связанные с действием ветра, в 2015–2017 гг. В сборнике: Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов («Опасные явления – II») // Материалы II Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д. Г. Матишова (г. Ростов-на-Дону, 6–10 июля 2020 г.). Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2020. С. 95–100.
32. *Сорокина В. В., Титов В. В., Вереин Р. В., Попов Ю. В., Ковалева Г. В., Гаврилова И. Ю.* Первые комплексные данные о пыльной буре в восточном Приазовье в конце сентября – начале октября 2020 года. В сборнике: Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов («Опасные явления – III»). Материалы III Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д. Г. Матишова (г. Ростов-на-Дону, 16–18 июля 2021 г.). Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2021. С. 132–138.
33. Справочник «Органическое вещество Азовского моря и прилегающих районов Черного моря». http://atlas.ssc-ras.ru/sitemap-organic.html (дата обращения 14.09.2022).
34. Труды Южного научного центра Российской академии наук / гл. ред. акад. *Г. Г. Матишов*. Том VII: Природные и антропогенные факторы в трансформации экосистемы Западного Маныча / отв. ред. *д.г.н. С. В. Бердников*. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2018. 256 с.
35. Экологический атлас Азовского моря / *Матишов Г. Г.* (гл. ред.), *Голубева Н. И.* (отв. ред.), *Сорокина В. В.* (отв. ред.). Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2011. 328 с.
36. *Blöschl et al.,* Changing climate shifts timing of European floods // Science. 2017. 357 (6351). P. 588–590. https://doi.org/10.1126/science.aan2506.
37. Carbon Cascades from Land to Ocean in the Anthropocene. https://cordis.europa.eu/project/id/643052 (дата обращения 20.11.2022).
38. *Hanqiu Xu.* Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing. 2006. 27:14. P. 3025–3033. https://doi.org/10.1080/01431160600589179.
39. *McClain M. E., Boyer E. W., Dent C. L. et al.* Biogeochemical Hot Spots and Hot Moments at the Interface of Terrestrial and Aquatic Ecosystems // Ecosystems. 2003. Vol. 6. P. 301–312. https://doi.org/10.1007/s10021-003-0161-9.
40. U.S. DOE. Research Priorities to Incorporate Terrestrial-Aquatic Interfaces in Earth System Models: Workshop Report, DOE/SC-0187, U.S. Department of Energy Office of Science. 2017. tes.science.energy.gov.
41. What are the band designations for the Landsat satellites? https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites (дата обращения 20.11.2022).
42. *Xenopoulos M., Downing J. A., Kumar M. D., Menden-Deuer S., Voss M.* Headwaters To Oceans: Ecological and Biogeochemical Contrasts Across the Aquatic Continuum // Limnol. Oceanogr. 2017. 62. P. S3–S14. https://doi.org/10.1002/lno.10721.

Статья поступила в редакцию 23.11.2022, одобрена к печати 21.12.2022
Для цитирования: *Григоренко К. С., Сорокина В. В., Шевердяев И. В., Солтан А. А., Сушко К. С., Клещенков А. В., Сойер В. Г., Алешина Е. Г.* Актуальные аспекты изучения периодически пересыхающих акваторий в контексте углеродного цикла (на примере бассейна Нижнего Дона) // Океанологические исследования. 2022. № 50 (4). С. 73–100. https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(4).4.

RELEVANT ASPECTS OF STUDYING PERIODICALLY DRYING OUT WATER AREAS IN THE CONTEXT OF THE CARBON CYCLE (THE CASE OF THE LOWER DON BASIN)

K. S. Grigorenko, V. V. Sorokina, I. V. Sheverdyaev, A. A. Soltan, K. S. Sushko, A. V. Kleshchenkov, V. G. Soier, E. G. Alyoshina

Federal Research Center the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, 41, Chekhov prospekt, Rostov-on-Don, 344006, Russia,
e-mail: klim_grig@mail.ru

Investigations were carried out in the reservoirs of the Don delta and Western Manych to study the biogeochemical cycles of elements, mainly carbon, in the transition zones between land and water. The main physical and geographical processes that determine the supply, transfer and transformation of organic matter and the connectivity of aquatic and terrestrial ecosystems are identified. A decrease of the surface area, based on a comparison of remote sensing data in ArcGIS for the period 1985–2021, of the water surface of reservoirs in average of 15–16 % was established (in the Don delta, mainly due to the destruction of man-made ponds, in Manych – due to a decrease in the water level). It is possible to slow down biogeochemical processes in drained areas and change one type of process to another as a result of the absence of a hydrological flow.

A shift of geochemical barriers towards the river during surges and an increase of mineralized underground runoff during negative surges was recorded under the influence of surge phenomena in the Don Delta. For the system of reservoirs of the Western Manych, the presence of salinity gradients between its individual parts was noted. Investigations have established that the mixing zones of fresh and salt water – biogeochemical "hot spots", are characterized by a contrasting chemical composition and very different concentrations of organic and suspended matter. A tendency to a significant change in the structure of the upper part of the profile of alluvial soils of the river delta was noted with the continuing low water in the Lower Don. Areas with varying degrees of manifestation of soil-forming processes, as well as the main natural and anthropogenic factors that control these processes, have been identified.

Keywords: wetlands, water-land boundaries, steppe zone, natural waters, soils, carbon cycle, Lower Don

Acknowledgement: The publication was prepared as part of the implementation of the research programm of the SSC RAS "Studying the hydroclimatic features of periodically drying up water areas of Southern Russia in the context of the global carbon cycle" state registration No. 122103100027-3.

References

1. Alexandrova, L. N. and O. A. Naydenova, 1986: *Laboratorno-prakticheskie zanyatiya po pochvovedeniyu (Laboratory and practical classes in soil science).* Leningrad, Agropromizdat, 295 p.
2. Arinushkina, E. V., 1970: *Rukovodstvo po himicheskomu analizu pochv (Soil Chemical Analysis Guide).* Moscow, Publishing House of Moscow State University, 487 p.
3. Berdnikov, S. V., L. V. Dashkevich, and V. V. Kulygin, 2022: A New State in the Hydrological Regime of the Sea of Azov in the 21th Century. *Dokl. Earth Sc.*, **503**, 123–128, https://doi.org/10.1134/S1028334X22030059.
4. Blöschl, G. et al., 2017: Changing climate shifts timing of European floods. *Science*. Aug. 11, **357** (6351), 588–590, https://doi.org/10.1126/science.aan2506. PMID: 28798129.
5. *Carbon Cascades from Land to Ocean in the Anthropocene*, https://cordis.europa.eu/project/id/643052 (last accessed in 20.11.2022).
6. Dzhamalov, R. G., N. L. Frolova, and M. B. Kireeva, 2013: Current changes in river water regime in the Don River Basin. *Water Resour,* **40**, 573–584, https://doi.org/10.1134/S0097807813060043.
7. Dobrovolsky, G. V., 2005: *Pochvy rechnyh pojm centra russkoj ravniny.* 2-e izd.: pererab. i dop. *(Soils of river floodplains in the center of the Russian plain.* 2nd ed., revised and expanded). Moscow, Publishing House of Moscow State University, 268 p.
8. *Ekologicheskij atlas Azovskogo morya (Ecological atlas of the Sea of Azov)*, 2011. Ed. G. G. Matishov et al. Rostov-on-Don, SSC RAS Publ., 2011, 325 p.
9. *Gidrometeorologiya i gidrohimiya morej SSSR.* Ed. Gershanovich, D. E. et al. Tom V: *Azovskoe more.* (*Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR.* Volume V: *Sea of Azov*), 1991, St. Petersburg, Hydrometeoizdat, 236 p.
10. Golubkov, M. S., 2012: Pervichnaya produkciya planktona i destrukciya organicheskih veshchestv v solenyh ozerah Krymskogo poluostrova (Primary Plankton Production and Destruction of Organic Substances in Salt Lakes of the Crimean Peninsula). *Biology of inland waters*, Moscow, Nauka, **4**, 31–38.
11. Hanqiu, Xu, 2006: Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27:14, 3025–3033, https://doi.org/10.1080/01431160600589179.
12. Ilyina, L. P., I. V. Kovda, D. G. Nevidomskaya, K. S. Sushko, and E. G. Morgun, 2014: Osobennosti formirovaniya, sostav i svojstva suhostepnyh soloncevato-slityh pochvennyh kompleksov Doliny Manycha (Peculiarities of formation, composition, and properties of dry-steppy solonetzic-confluent soil complexes in the Manych Valley). *Bulletin of the Southern Scientific Center*, 2014, **10** (4), 61–72.
13. Ilyina, L. P. and K. S. Sushko, 2018: Osobennosti formirovaniya, sostav i svojstva suhostepnyh zasolennyh pochvennyh kompleksov Doliny Manycha (Peculiarities of formation, composition and properties of dry-steppe salt soil complexes in the Manych Valley). *Proceedings of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.* Vol. VII: *Natural and anthropogenic factors in the transformation of Western Manych ecosystems.* Rostov-on-Don, SSC RAS, 138–151.
14. Kaurichev, I. S., 1980: *Praktikum po pochvovedeniyu (Workshop on soil science).* Moscow, Kolos, 1980, 280 p.
15. Kleshchenkov, A. V. and A. Yu. Moskovets, 2021: Intruzii solenyh vod v del'tu Dona: zakonomernosti razvitiya i posledstviya (Salt water intrusions in the Don Delta: patterns of development and consequences). *Science of the South of Russia*, **17** (3), 30–37.

16. Korytny, L. M., 2001: *Bassejnovaya koncepciya v prirodopol'zovanii (Basin concept in nature management).* Irkutsk, Publishing House of the Institute of Geography SB RAS, 2001, 163 p.
17. Matishov, G. G., 2015: Kerchenskij proliv i del'ta Dona: bezopasnost' kommunikacij i naseleniya (The Kerch Strait and the Don Delta: the security of communications and the population). *Bulletin of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, **11** (1), 6–15.
18. Matishov, G. G., 2016: *Klimat, vodnye resursy i rekonstrukciya gidrotekhnicheskih sooruzhenij s uchetom interesov naseleniya, rybolovstva i sel'skogo hozyajstva, sudohodstva i energetiki (Climate, water resources and reconstruction of hydraulic structures, taking into account the interests of the population, fisheries and agriculture, shipping and energy).* Report at the expanded meeting of the Presidium of the SSC RAS (Rostov-on-Don, May 25, 2016). Rostov-on-Don, SSC RAS Publ., 64 p.
19. Matishov, G. G., 2015: Sluchai ekstremal'noj advekcii solenyh vod v del'tu Dona i l'da v Kerchenskij proliv (Cases of extreme advection of salt water into the Don delta and ice into the Kerch Strait). *Reports of the Academy of Sciences*, **465** (1), 99–103.
20. Matishov, G. G. and S. V. Berdnikov, 2015: Ekstremal'noe zatoplenie del'ty Dona vesnoj 2013 g. (Extreme flooding of the Don delta in the spring of 2013). *News of the Russian Academy of Sciences,* Geographic series, **1**, 111–118.
21. Matishov, G. G. and K. S. Grigorenko, 2017: Causes of salinization of the Gulf of Taganrog. *Dokl. Earth Sc.,* **477**, 1311–1315, https://doi.org/10.1134/S1028334X17110034.
22. Matishov, G. G., K. S. Grigorenko, N. I. Bulysheva, and A. Yu. Moskovets, 2021: Novye dannye o roli podzemnyh i chernomorskih vod v azovo-donskom bassejne v period malovod'ya (New data on the role of groundwater and Black Sea waters in the Azov-Don basin during low water periods). *Science of the South of Russia*, **17** (2), 34–48.
23. Matishov, G. G., K. S. Grigorenko, and A. Yu. Moskovets, 2017: Mekhanizmy osoloneniya Taganrogskogo zaliva v usloviyah ekstremal'no nizkogo stoka Dona (Mechanisms of Salinization of the Taganrog Bay in the Conditions of Extremely Low Flow of the Don). *Science of the South of Russia*, **13** (1), 35–43.
24. Matishov, G. G., L. V. Dashkevich, V. V. Titov, and E. E. Kirillova, 2021: Analiz vnutrivekovoj prirodnoj izmenchivosti v Priazov'e i na Nizhnem Donu: prichina malovod'ya (Analysis of intra-secular natural variability in the Sea of Azov and on the Lower Don: the cause of low water). *Science of the South of Russia*, **17** (1), 13–23.
25. Matishov, G. G., A. L. Chikin, S. V. Berdnikov, and I. V. Sheverdyaev, 2014: Ekstremal'noe navodnenie v del'te Dona (23–24 marta 2013 g.) i faktory, ego opredelyayushchie (Extreme flooding in the Don Delta (March 23–24, 2013) and factors that determine it). *Reports of the Academy of Sciences*, **455** (3), 342.
26. Matishov, G. G., A. L. Chikin, S. V. Berdnikov, I. V. Sheverdyaev, A. V. Kleschenkov, and E. E. Kirillova, 2014: Ekstremal'noe zatoplenie del'ty Dona vesnoj 2013 g.: hronologiya, usloviya formirovaniya i posledstviya (Extreme flooding of the Don delta in the spring of 2013: chronology, formation conditions and consequences). *Bulletin of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, **10** (1), 17–24.
27. McClain, Michael E., Elizabeth W. Boyer, C. Lisa Dent, Sarah E. Gergel, Nancy B. Grimm, Peter M. Groffman, Stephen C. Hart, Judson W. Harvey, Carol A. Johnston, Emilio Mayorga, William H. McDowell, and Gilles Pinay, 2003: *Biogeochemical Hot Spots and Hot Moments at the Interface of Terrestrial and Aquatic Ecosystems. Ecosystems*, **6**, 301–312, https://doi.org/10.1007/s10021-003-0161-9.
28. Orlov, D. S. and L. A. Grishina, 1981: *Praktikum po biohimii gumusa (Workshop on the biochemistry of humus).* Moscow, Publishing House of Moscow. Univ., 1981, 271 p.

29. Panov, V. D., P. M. Lurie, and Yu. A. Larionov, 2006: *Klimat Rostovskoj oblasti: vchera, segodnya, zavtra. (Climate of the Rostov region: yesterday, today, tomorrow).* Rostov-on-Don, Publisher LLC "Don Publishing House", 488 p.
30. Ponomarenko, E. P., V. V. Sorokina, and P. A. Biryukov, 2012: Sgonno-nagonnye yavleniya v del'te reki Don v period s 2007 po 2010 g. i ih prognozirovanie (Surge phenomena in the Don River Delta in the period from 2007 to 2010 and their forecasting). *Bulletin of the southern scientific center of the Russian Academy of Sciences*, **8** (1), 28–37.
31. Rozanov, B. G., 2004: *Morfologiya pochv: uchebnik dlya vysshej shkoly (Soil morphology: a textbook for higher education).* Moscow, Academic project, 2004, 432 p.
32. Sayapin, V. V., V. G. Sawyer, M. S. Milutka, and A. V. Kleshchenkov, 2018: Produkcionno-destrukcionnye processy i transformaciya organicheskogo veshchestva v planktonnom soobshchestve oz. Manych-Gudilo (Production-destructive processes and transformation of organic matter in the plankton community of the lake. Manych-Gudilo). *Proceedings of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.* T. VII: *Natural and anthropogenic factors in the transformation of Western Manych ecosystems.* Rostov-on-Don, SSC RAS Publ., 57–68.
33. Smirnov, R. N., 1968: Pochvenno-meliorativnye usloviya pojmy i del'ty nizhnego techeniya reki Don (Soil and reclamation conditions of the floodplain and delta of the lower reaches of the Don River). *Soil science*, **9**, 82–91.
34. Sorokina, V. V. and V. S. Gerasyuk, 2018: Variacii gidrohimicheskih pokazatelej v vodnom kontinuume Nizhnij Don – Chernoe more (Variations in hydrochemical parameters in the water continuum Lower Don – Black Sea). *Ecology. Economy. Informatics. Series: System Analysis and Modeling of Economic and Ecological Systems,* Rostov-on-Don, SSC RAS Publ., **3**, 251–257, https://doi.org/10.23885/2500-395x-2018-1-3-251-257.
35. Sorokina, V. V., O. V. Ivlieva, and P. M. Lurie, 2006: Dinamika stoka na ust'evyh uchastkah rek Don i Kuban' vo vtoroj polovine XX veka (Runoff dynamics in the mouth sections of the Don and Kuban rivers in the second half of the 20th century). *Bulletin of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, **2** (2), 58–67.
36. Sorokina, V. V., A. Yu. Moskovets, and A. V. Kleshchenkov, 2020: Ekstremal'nye gidrologicheskie yavleniya v del'te Dona, svyazannye s dejstviem vetra, v 2015–2017 gg. (Extreme hydrological events in the Don Delta associated with the action of wind in 2015–2017). In the collection: Patterns of formation and impact of marine, atmospheric hazardous phenomena and disasters on the coastal zone of the Russian Federation in the context of global climatic and industrial challenges ("Hazardous Phenomena – II"). *Proceedings of the II International Scientific Conference in Memory of Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences D. G. Matishova (Rostov-on-Don, July 6–10, 2020).* Rostov-on-Don, SSC RAS Publ., 95–100.
37. Sorokina, V. V., V. V. Titov, R. V. Verein, Yu. V. Popov, G. V. Kovaleva, and I. Yu. Gavrilova, 2021: Pervye kompleksnye dannye o pyl'noj bure v vostochnom Priazov'e v konce sentyabrya – nachale oktyabrya 2020 goda (The first comprehensive data on a dust storm in the eastern Azov region in late September – early October 2020). In the collection: Patterns of formation and impact of marine, atmospheric hazardous phenomena and disasters on the coastal zone of the Russian Federation in the context of global climatic and industrial challenges ("Hazardous Phenomena – III"). *Proceedings of the III International Scientific Conference in Memory of Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences D. G. Matishova (Rostov-on-Don, July 16–18, 2021).* Rostov-on-Don, SSC RAS Publ., 132–138.
38. *Spravochnik "Organicheskoe veshchestvo Azovskogo morya i prilegayushchih rajonov Chernogo moray"* (Catalog "Organic matter of the Sea of Azov and adjacent areas of the Black Sea"), http://atlas.ssc-ras.ru/sitemap-organic.html (last accessed in 14.09.2022).

39. Trudy Yuzhnogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk (Proceedings of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences), 2018, Ch. ed. acad. G. G. Matishov. Volume VII: *Natural and anthropogenic factors in the transformation of the Western Manych ecosystem*, Ed. S. V. Berdnikov, Rostov-on-Don, SSC RAS Publ., 256 p.
40. *U. S. DOE. Research Priorities to Incorporate Terrestrial-Aquatic Interfaces in Earth System Models*. 2017. Workshop Report, DOE/SC-0187, U.S. Department of Energy Office of Science, tes.science.energy.gov.
41. *What are the band designations for the Landsat satellites?* https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites (last accessed in 20.11.2022).
42. Xenopoulos, M., J. A. Downing, M. D. Kumar, S. Menden-Deuer, M. Voss, 2017: Headwaters To Oceans: Ecological and Biogeochemical Contrasts Across the Aquatic Continuum. *Limnol. Oceanogr.*, **62**, S3–S14, https://doi.org/10.1002/lno.10721.

Submitted 23.11.2022, accepted 21.12.2022.
For citation: Grigorenko, K. S., V. V. Sorokina, I. V. Sheverdyaev, A. A. Soltan, K. S. Sushko, A. V. Kleshchenkov, V. G. Soier, and E. G. Alyoshina, 2022: Relevant aspects of studing periodically drying out water areas in the context of the carbon cycle (the case of the Lower Don Basin). *Journal of Oceanological research*, **50** (4), 73–100, https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(4).4.