

УДК: 551.468.6, 551.506.3, 574.52
DOI: 10.7868/S25000640230204

МОНИТОРИНГ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ НА ВЗМОРЬЕ ДОНА В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

© 2023 г. Академик Г.Г. Матишов^{1,2}, К.С. Григоренко¹, М.М. Чеха¹, Е.Г. Алешина¹

Аннотация. Выполнена задача исследования динамики типов химической композиции вод в условиях частых чередований высокого и низкого уровней воды. Построена классификация характерного химического состава при разных гидрологических режимах (ветровых сгонах и нагонах). Работа основана на данных мониторинга гидрометеорологической обстановки Нижнего Дона. В сеть постов Южного научного центра Российской академии наук входят восемь автоматических гидрометеорологических комплексов, расположенных на разных участках устьевой области Дона. В работе представлены новые результаты исследования изменений гидрохимического режима дельты Дона в условиях аридизации климата. Раскрыта динамика изменений характерных типов минерализации при быстрых перепадах уровня воды. Выделены основные типы, отличающиеся анионами: грунтовый тип минерализации (SO_4^{2-} более 70 %, общее содержание солей 5–7 г/л), морской (Cl^- 70–80 %, общее содержание солей до 8 г/л) и донской (30–40 % HCO_3^- -ионов, пониженная до 1–1,5 г/л минерализация). При чередовании серий верховок – низовок формируются смешанные воды: с повышенными долями хлоридов при доминировании грунтовой воды и верховках после нагонов, а также гидрокарбонатов в условиях распреснения грунтовых вод при подъеме уровня воды после экстремальных сгонов. Аномальное маловодье Дона приводит к формированию ранее неизвестных геохимических зависимостей на разных участках бассейна. Необходима более обширная сеть мониторинга в дельте, так как неизвестно, как осолонение бассейна проявляется в районах забора воды для городского водоснабжения. Восстановление утраченной сети гидропостов позволит приспособиться к дефициту водных ресурсов, а также получить обоснованные рекомендации для природопользования в современных условиях.

Ключевые слова: дельта Дона, маловодье, изменения климата, ионный состав вод, сгонно-нагонные явления, подземный сток.

MONITORING OF HYDROCHEMICAL TRANSFORMATIONS ON THE DON SEASHORE IN REAL TIME

Academician RAS G.G. Matishov^{1,2}, K.S. Grigorenko¹, M.M. Chekha¹, E.G. Aleshina¹

Abstract. The dynamics of the types of waters chemical composition under conditions of frequent alternations of high and low water levels has been studied in the current work. A classification of the characteristic chemical composition under different hydrological regimes (positive and negative water setups) has been constructed. The work is based on monitoring data of the hydrometeorological situation in the Lower Don. The paper presents new results of an investigation of changes in the hydrochemical regime of the Don Delta under conditions of climate aridization. The dynamics of changes in the characteristic types of mineralization during rapid changes in water level was revealed. The main types distinguished by anions were marked: ground type of mineralization (SO_4^{2-} more than 70%, total salt content 5–7 g/l), marine (Cl^- 70–80%, total salt content up to 8 g/l) and Don (30–40% HCO_3^- ions, mineralization reduced to 1–1.5 g/l). During alternating series of positive and negative water setups, mixed waters are formed: with increased

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: matishov_ssc-ras@ssc-ras.ru

² Мурманский морской биологический институт Российской академии наук (Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17

proportions of chlorides with the dominance of groundwater during negative setup after positive, as well as hydrocarbonates in conditions of groundwater desalination when the water level rises after extreme negative water setup. The abnormal Don lack of water leads to the formation of previously unknown geochemical dependencies in different parts of the basin. A more extensive monitoring network in the delta is necessary, because it is not known how salinization of the basin manifests itself in the areas of water intake for urban water supply. The restoration of the lost network of hydrometeorological stations will make it possible to adapt to the shortage of water resources, as well as to obtain reasonable recommendations for nature management in modern conditions.

Keywords: Don delta, lack of water, climate change, ionic composition of waters, positive and negative water setups, underground runoff.

В последние годы явных признаков смены климатической тенденции на юге России не наблюдается. В регионе по-прежнему ощущается острый дефицит атмосферных осадков. Засуха негативно сказывается на степных экосистемах, водности малых рек. Помимо снижения количества снега, в верхнем течении Дона зимой перестала промерзать почва [1]. В результате талые воды насыщают почву, но не формируют в реках волну половодья на водосборе. Цимлянское водохранилище не получает объемов вод, заложенных при проектировании. Попуски гидроузла в таких условиях иногда не превышают 200 м³/с (02.03.2023 г. сбросы составили 160 м³/с). Водохранилище не набирает нужного объема и в течение всего года сбрасывает только минимально допустимое для судоходства количество воды. Недостаток речной воды приводит к росту минерализации вод.

В водосборном бассейне Дона можно выделить разные механизмы изменения гидрохимического режима на разных участках. Становится выраженным влияние слабосолоноватых притоков, таких как р. Сал. В результате прекращения притока воды из Дона через Пролетарскую ветвь Донского магистрального канала Пролетарское водохранилище сильно изменилось [2]. Химический состав вернулся к естественному состоянию высокосолевого оз. Маныч-Гудило. В устьевой области Дона выросла доля грунтового питания [3; 4]. Сменились преобладающие ионные группы. Если раньше Дон характеризовался кальциево-гидрокарбонатным составом, то сегодня в створе Ростова-на-Дону доминируют натриево-сульфатные ионы [5–9].

Дельта Дона отличается наиболее переменчивым (динамичным) режимом солености [10–13]. На взморье воды морского происхождения взаимодействуют с водами речного и подземного стока. При нагонах адвекция азовоморских вод достигает 30–40 км вверх по руслу, соленая вода закачивается

в системы городского водоснабжения. При сгонах часть рукавов дельты отделяется друг от друга мелководными и осушенными порогами. Водообмен между ними прекращаются. Такие отчлененные русла рукавов и малых рек заполняются водами из верхних береговых водоносных горизонтов.

Предыдущие исследования достаточно подробно раскрыли процессы засоления дельты [3; 4]. В текущей работе поставлена задача исследования динамики типов химической композиции вод в условиях частых чередований высокого и низкого уровней воды. Необходимо построить классификацию характерного химического состава при разных гидрологических режимах (ветровых сгонах и нагонах).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Работа основана на данных мониторинга гидрометеорологической обстановки Нижнего Дона. В сеть постов Южного научного центра Российской академии наук (ЮНЦ РАН) входят восемь автоматических гидрометеорологических комплексов, расположенных на разных участках устьевой области Дона, а также в бассейне р. Западный Маныч. Посты оборудованы метеостанциями М-49М, лазерными уровнемерами и датчиками электропроводности «Солис СЛ15-10Т». Дискретность измерений – 10 минут. Соленость рассчитана согласно шкале электропроводности PSS-78 [14]. На сегодняшний день в базу данных входит более 400 тысяч измерений гидрологического режима дельты Дона.

На борту научно-исследовательских судов «Де-неб» и «Профессор Панов» ежегодно, в период с марта по декабрь, проводятся экспедиции, охватывающие регион от Черного до Каспийского морей, включая речные маршруты Дона, Северского Донца, Цимлянского водохранилища и дельты Волги. Измерения ведутся с помощью стандартного океанографического оборудования: CTD – зондов

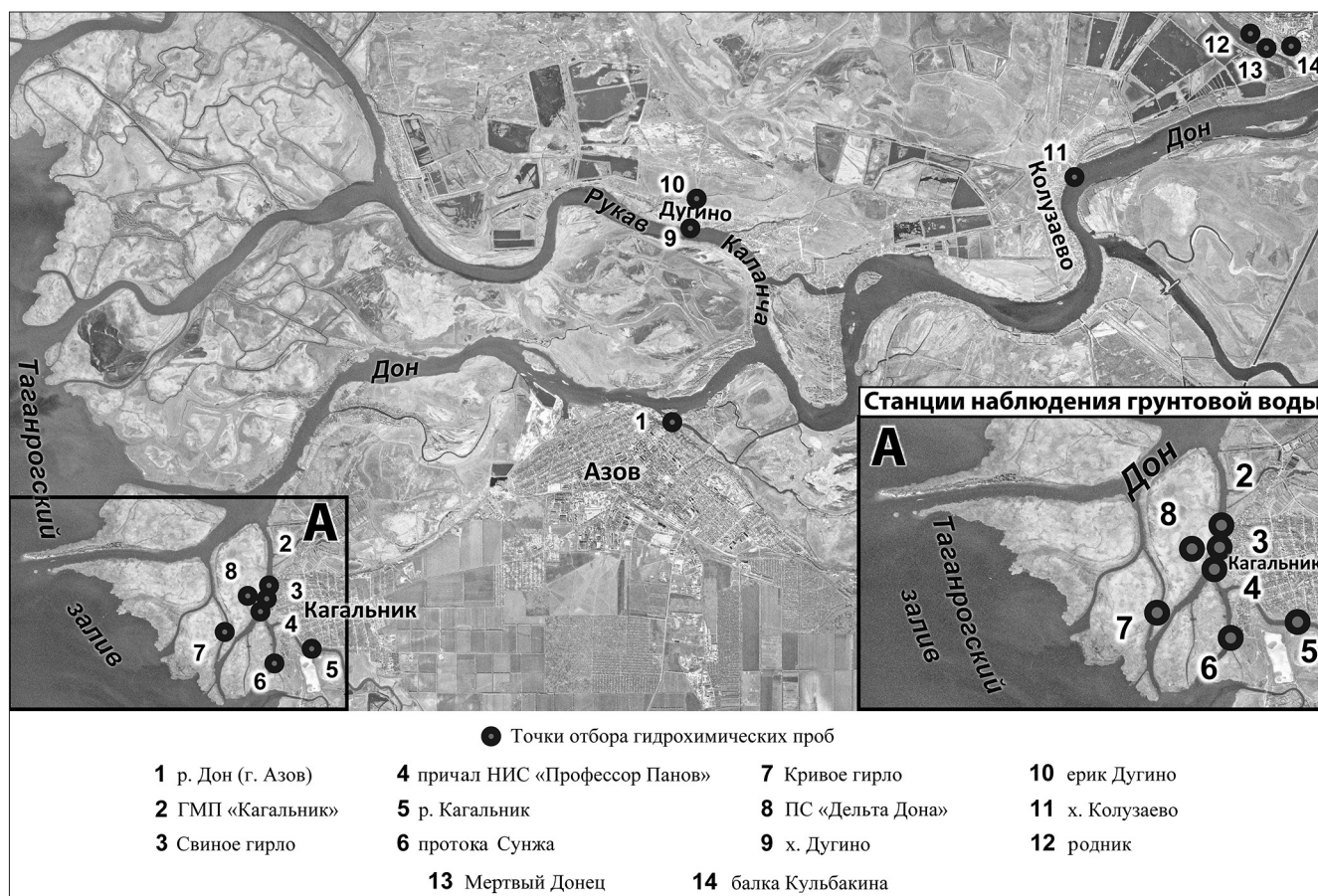


Рис. 1. Схема отбора гидрохимических проб с 02.12.2022 г. по 16.01.2023 г.

Fig. 1. Hydrochemical sampling map from December 2, 2022 to January 16, 2023.

SBE-19, SBE-19V2+, CTD-60m, CTD-90, CTD-48; ADCP – буйковой станции Aanderaa RCM9LW. В гидрохимической лаборатории ИОНЦ РАН выполняют анализы содержания кислорода, биогенных элементов, ионного состава, растительных пигментов, органического вещества.

Работы произведены в зимний период в обстановке типичных для этого сезона сильных сгонов донской воды в Азовское море. Эксперимент был направлен на выявление химического состава вод южной части дельты Дона. Период непрерывного пробоотбора охватил характерные сгоны (верховки) с 02.12.2022 г. по 16.01.2023 г. Для сравнительного контроля параметров среды рассмотрены результаты анализа ионного состава 25.05.2022 г., а также отбирались единичные пробы до 17.04.2023 г. Всего отобрано 36 проб воды (рис. 1, табл. 1). Из всего массива данных (табл. 1) для построения рисунка 1 использованы результаты анализа на одной станции отбора проб – на причале береговой научно-экспедиционной базы (БНЭБ) «Кагальник»

(табл. 2). Образцы отбирали при разном уровне воды, от минимального (31 см уровнемерной рейки) до максимального, во время сильного нагона (247 см рейки). Нормальный уровень воды при отсутствии ветра составляет 170 см. Перепад уровня составил 216 см. 12.01.2023 г. пробы отбирали из-под льда, в условиях подъема уровня воды при низовке. Минерализация вод измерена лабораторным методом. Все материалы классифицированы по концентрации основных ионов, исследуемых в природных водах: катионы – $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ (натрий и калий), Ca^{2+} (кальций), Mg^{2+} (магний) и анионы – SO_4^{2-} (сульфаты), Cl^- (хлориды), HCO_3^- (гидрокарбонаты).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Описываемый эксперимент охватывает гидрохимические преобразования вод в реальном времени на взморье Дона (02.12.2022–16.01.2023). При слабых ветрах и минимальных колебаниях уровня

Таблица 1. Ионный состав проб воды в дельте Дона
Table 1. Ionic composition of water samples in the Don Delta

Место и время отбора Sampling point and time	Cl ⁻ мг/л mg/l	HCO ₃ ⁻ мг/л mg/l	SO ₄ ²⁻ мг/л mg/l	Ca ²⁺ мг/л mg/l	Mg ²⁺ мг/л mg/l	Na ⁺ + K ⁺ мг/л mg/l	Общая минерализация, г/л Mineralization, g/l	Уровень воды, см уровнемерной рейки / Water level, cm of level gauge
Родниковая вода, Ростов-на-Дону [6] Spring water, Rostov-on-Don [6]	126–553,2	419,2–805,5	586,8–1824,3	177,9–453,4	69,6–205,1	203,9–538,2		
БНЭБ «Кагальник», поверхность SEB “Kagalnik”, surface 25.05.2022	850,8	312,4	1873,2	180,4	177,5	1113	4,5	201
БНЭБ «Кагальник», дно SEB “Kagalnik”, bottom 25.05.2022	886,3	314,9	1873,2	204,4	162,9	1139	4,6	201
Свиное гирло, возле берега Svinee arm, near the riverside 25.05.2022	850,8	292,9	1825,1	192,4	165,4	1090	4,4	201
БНЭБ «Кагальник» / SEB “Kagalnik” 02.12.2022, 10:30	744,5	454,0	2401,5	336,7	239,6	1048,5	5,2	32
Причал НИС «Профессор Панов» Berth of the R/V “Professor Panov” 02.12.2022, 10:50	744,5	466,2	2209,4	328,7	214,0	1016	5,0	31
Свиное гирло / Svinoe arm 02.12.2022, 11:00	726,7	441,8	2497,6	312,6	211,6	1168,5	5,4	31
Свиное гирло / Svinoe arm 07.12.2022, 9:00	726,7	471,1	2593,6	296,6	270,0	1130,5	5,5	78
Причал НИС «Профессор Панов» Berth of the R/V “Professor Panov” 07.12.2022, 9:10	744,5	458,9	2689,7	336,7	245,6	1188	5,7	79
БНЭБ «Кагальник» / SEB “Kagalnik” 07.12.2022, 9:30	744,5	471,1	2497,6	344,7	265,1	1043	5,4	80
БНЭБ «Кагальник» / SEB “Kagalnik” 09.12.2022, 9:00	212,7	300,2	576,4	128,3	63,3	283	1,6	152
Свиное гирло / Svinoe arm 09.12.2022, 9:30	202,1	302,7	528,3	140,3	51,1	261,5	1,5	150
Причал НИС «Профессор Панов» Berth of the R/V “Professor Panov” 09.12.2022, 9:50	202,1	305,1	576,3	128,3	73,0	257,5	1,5	151
БНЭБ «Кагальник» / SEB “Kagalnik” 12.12.2022	163,1	270,9	422,7	104,2	38,9	236,0	1,2	145
Причал НИС «Профессор Панов» Berth of the R/V “Professor Panov” 12.12.2022	156,0	275,8	384,2	108,2	43,8	198,0	1,2	145
Свиное гирло / Svinoe arm 12.12.2022	163,1	275,8	384,2	100,2	48,64	203,0	1,2	145
Причал НИС «Профессор Панов» Berth of the R/V “Professor Panov” 14.12.2022, 10:00	248,2	322,2	461,1	112,2	53,5	297	1,5	236

Продолжение табл. 1

Место и время отбора Sampling point and time	Cl ⁻ мг/л mg/l	HCO ₃ ⁻ мг/л mg/l	SO ₄ ²⁻ мг/л mg/l	Ca ²⁺ мг/л mg/l	Mg ²⁺ мг/л mg/l	Na ⁺ + K ⁺ мг/л mg/l	Общая минерализация, г/л Mineralization, g/l	Уровень воды, см уровнемерной рейки / Water level, cm of level gauge
БНЭБ «Кагальник» / SEB "Kagalnik" 14.12.2022, 10:30	248,2	300,2	480,3	120,2	48,6	298	1,5	231
Свиное гирло / Svinoe arm 14.12.2022	255,2	285,6	461,1	112,2	55,9	282	1,5	226
Свиное гирло / Svinoe arm 31.12.2022, 13:30	163,1	258,7	288,2	104,2	41,3	156,0	1,0	180
Свиное гирло, дно Svinoe arm, bottom 31.12.2022, 13:30	163,1	266,1	384,24	96,2	55,9	189,0	1,2	180
БНЭБ «Кагальник» / SEB "Kagalnik" 02.01.2023, 14:08	226,9	268,5	365,03	96,2	51,1	235,0	1,2	247
БНЭБ «Кагальник» / SEB "Kagalnik" 10.01.2023, 16:00	531,6	319,7	1440,9	176,4	160,5	706	3,3	70
Причал НИС «Профессор Панов» Berth of the R/V "Professor Panov" 10.01.2023, 16:10	780,0	446,7	2305,4	284,6	211,6	1143	5,2	70
Азов, р. Дон, протока Азовка Azov, Don River, Azovka arm 11.01.2023	241,1	351,5	614,8	144,3	65,7	319	1,7	44
Причал НИС «Профессор Панов» Berth of the R/V "Professor Panov" 11.01.2023	1666	512,6	2497,6	328,7	250,5	1760	7,0	50
БНЭБ «Кагальник» / SEB "Kagalnik" 11.01.2023	1666	512,6	2497,6	328,7	274,8	1710	7,0	50
Свиное гирло / Svinoe arm 11.01.2023	1630	502,8	1873,2	312,6	260,2	1406	6,0	50
Кривое гирло / Krivoe arm 11.01.2023	2375	751,8	1392,9	320,6	194,6	1908	6,9	50
Протока Сунжа / Sunzha arm 11.01.2023	1453	497,9	2065,3	280,6	218,9	1504	6,0	50
Ерик Орнитологический Ornithological arm 11.01.2023	1134	654,1	1248,8	248,5	116,7	1168	4,6	50
Река Кагальник / Kagalnik River 11.01.2023	1666	522,3	2593,6	320,6	255,4	1814	7,2	50
БНЭБ «Кагальник», фонтан из-под льда / SEB "Kagalnik", ice fountain 12.01.2023	1630	541,9	2209,4	408,8	250,5	1497	6,5	60
Хутор Дугино, протока Каланча Dugino village, Kalancha arm 12.01.2023, 14:38	170,1	349,0	461,1	124,3	58,4	228	1,4	90
Ерик Дугин / Dugin arm 12.01.2023, 15:08	354,5	288,0	211,3	104,2	58,4	228	1,2	90

Окончание табл. 1

Место и время отбора Sampling point and time	Cl ⁻ мг/л mg/l	HCO ₃ ⁻ мг/л mg/l	SO ₄ ²⁻ мг/л mg/l	Ca ²⁺ мг/л mg/l	Mg ²⁺ мг/л mg/l	Na ⁺ + K ⁺ мг/л mg/l	Общая минерализация, г/л Mineralization, g/l	Уровень воды, см уровнемерной рейки / Water level, cm of level gauge
Хутор Колузаево, р. Дон Koluzaevo village, Don River 12.01.2023, 15:29	198,5	363,8	422,7	136,2	55,9	224	1,4	90
Мертвый Донец / Mervyy Donets arm 12.01.2023, 15:48	191,4	380,8	595,6	164,3	58,4	276	1,7	90
Ручей балки Кульбакина Kulbakin beam, stream 12.01.2023, 16:05	230,4	483,3	1104,7	276,6	87,6	410,5	2,6	90
Родник, Мертвый Донец Spring, Mervyy Donets arm 12.01.2023, 16:10	212,7	400,3	1537,0	280,6	114,3	529	3,1	90
БНЭБ «Кагальник» / SEB «Kagalnik» 16.01.2023	191,4	300,2	441,9	148,3	34,1	233,0	1,4	180
БНЭБ «Кагальник» / SEB «Kagalnik» 07.02.2023	638,1	424,7	1585,0	280,6	165,4	759,0	3,9	60
БНЭБ «Кагальник» / SEB «Kagalnik» 08.02.2023	779,9	495,5	2209,4	304,6	240,8	1028,0	5,1	40
БНЭБ «Кагальник» / SEB «Kagalnik» 21.02.2023	276,6	297,8	518,7	128,3	58,4	307,0	1,6	300
БНЭБ «Кагальник» / SEB «Kagalnik» 21.02.2023, 14:10	241,1	300,2	461,1	124,3	63,2	248,0	1,4	391
БНЭБ «Кагальник» / SEB «Kagalnik» 21.02.2023, 16:35	255,2	290,5	499,5	128,3	65,7	264,0	1,5	391
Порт Азов / Seaport «Azov» 21.02.2023, 17:40	184,3	297,8	345,8	116,2	51,1	182,0	1,2	391
БНЭБ «Кагальник» / SEB «Kagalnik» 30.03.2023	234,0	249,0	403,5	136,3	63,2	177,0	1,3	174
БНЭБ «Кагальник» / SEB «Kagalnik» 17.04.2023, 9:10	744,5	407,6	1392,9	248,5	201,9	692,0	3,7	90

Примечание. БНЭБ – береговая научно-экспедиционная база; НИС – научно-исследовательское судно.

Note. SEB – scientific expeditionary base; R/V – research vessel.

воды дельта Дона заполнена пресными водами с минерализацией менее 1 г/л. Такие значения характерны для всего течения от впадения слабосоленоватого (более 2 г/л) Маныча до устья. Колебания уровня воды в дельте при таких условиях вызваны сейшми Азовского моря. Подобно приливам и отливам океана повышение и падение уровня строго циклично, значимые периоды составляют 12–24 ч. В пучностях сейш (у противоположных берегов) изменения уровня максимальны (50–60 см), а ско-

рости течений минимальны, поэтому морские воды не проникают в дельту. Для речных вод Дона в настоящее время характерен натриево-гидрокарбонатный состав. Ранее, 20–30 лет назад, основным был кальциево-гидрокарбонатный состав [8; 9].

По мере развития нагонного явления появляются слабосоленоватые воды (2–4 г/л) натриево-хлоридного, типично морского, состава. Трансформированные черноморские воды проникают в дельту по наиболее глубокой искусственной прорези Азо-

во-Донского морского канала, но чаще всего не вытесняют речные воды из русел и проток.

Сильные низовки (нагоны) приносят солоноватые (4–8 г/л) и высокосолоноватые (морские, более 8 г/л) воды. Уровень моря растет на 1–2 и более метров. При таком уровне воды покрывают дельту, затапливают острова, проникают вверх по течению Дона, распространяясь выше Ростова-на-Дону (40 км от устья). После ослабления западных ветров солоноватые и высокосолоноватые воды стекают по мелким ерикам и рукавам. Влияние черноморских вод после низовки фиксируется в течение двух недель, что видно по гидрохимическим пробам.

При падении уровня воды в протоках дельты на 1–1,5 м ниже средней линии датчики солёности фиксируют наличие слабосоловатых вод (более 2 г/л) в гирле Свином при сильных верховках (падение уровня воды более чем на 30 см). В пробах ионного состава доказан рост содержания сульфат-ионов. Это следствие изоляции частей дельты

мелководными порогами от пресного стока Дона. Южная часть дельты в таких условиях заполняется стоком р. Кагальник, для которой характерна высокая доля подземного питания. Воды р. Кагальник и рукавов взморья имеют высокую долю сульфатов среди анионов. Такой же ионный состав имеют воды из скважин, пробуренных на берегах в бассейне р. Кагальник.

При экстремальных верховках водообмен с Доном и Таганрогским заливом прекращается. В пробах фиксируются солоноватые воды подземного стока с выраженным натриево-сульфатным составом и рост минерализации до 5–7 г/л.

В условиях частой нециклической смены гидрологической обстановки и перепадов уровня воды от сильных нагонов к сильным сгонам водотоки наполняют солоноватые воды смешанного состава. Подземный сток разбавляется стекающей с островов морской водой. Максимальное содержание катионов в таких случаях имеет ион Na^+ . Доля

Таблица 2. Ионный состав проб воды на причале БНЭБ «Кагальник»

Table 2. Ionic composition of water samples at the berth of the scientific expeditionary base “Kagalnik”

Дата, время отбора Sampling date, time	Cl^- мг/л mg/l	HCO_3^- мг/л mg/l	SO_4^{2-} мг/л mg/l	Ca^{2+} мг/л mg/l	Mg^{2+} мг/л mg/l	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$ мг/л mg/l	Общая минерализация, г/л Mineralization, g/l	Уровень воды, см уровнемерной рейки / Water level, cm of level gauge
02.12.2022, 10:30	744,5	454,0	2401,5	336,7	239,6	1048,5	5,2	32
07.12.2022, 9:30	744,5	471,1	2497,6	344,7	265,1	1043	5,4	80
09.12.2022, 9:00	212,7	300,2	576,4	128,3	63,3	283	1,6	152
12.12.2022	163,1	270,9	422,7	104,2	38,9	236,0	1,2	145
14.12.2022, 10:30	248,2	300,2	480,3	120,2	48,6	298	1,5	231
31.12.2022, 13:30	163,1	266,1	384,24	96,2	55,9	189,0	1,2	180
02.01.2023, 14:08	226,9	268,5	365,03	96,2	51,1	235,0	1,2	247
10.01.2023, 16:00	531,6	319,7	1440,9	176,4	160,5	706	3,3	70
11.01.2023	1666	512,6	2497,6	328,7	274,8	1710	7,0	50
12.01.2023	1630	541,9	2209,4	408,8	250,5	1497	6,5	60
16.01.2023	191,4	300,2	441,9	148,3	34,1	233,0	1,4	180
07.02.2023	638,1	424,7	1585,0	280,6	165,4	759,0	3,9	60
08.02.2023	779,9	495,5	2209,4	304,6	240,8	1028,0	5,1	40
21.02.2023	276,6	297,8	518,7	128,3	58,4	307,0	1,6	300
21.02.2023, 14:10	241,1	300,2	461,1	124,3	63,2	248,0	1,4	391
21.02.2023, 16:35	255,2	290,5	499,5	128,3	65,7	264,0	1,5	391
30.03.2023	234,0	249,0	403,5	136,3	63,2	177,0	1,3	174
17.04.2023, 9:10	744,5	407,6	1392,9	248,5	201,9	692,0	3,7	90

ионов Cl^- среди анионов может сравняться с таковой ионов SO_4^{2-} . Гидрокарбонат-ионов (HCO_3^-) содержится сравнительно небольшое количество.

С ослабеванием ветра нормализуются колебания уровня воды. Донской сток вытесняет морские воды. Подземное питание становится неразличимо. Минерализация понижается до 1 г/л. Растет содержание гидрокарбонатов в группе анионов.

Во время эксперимента в период с 02.12.2022 г. по 16.01.2023 г. максимальная минерализация вод составила 7 г/л (солончатые воды) 11.01.2023 г. Обнаружена зависимость между типом ионного состава и уровнем воды, а также последовательность смены таких типов в зависимости от гидрологических условий. Во всех пробах среди анионов преобладают сульфаты, а среди катионов – группа натрия и калия. В зависимости от источника поступления вод в протоки меняются местами хлориды и гидрокарбонаты в качестве второй по содержанию группы анионов после сульфатов.

Анализ изменения типов минерализации проведен по данным таблицы 1. Всего выделено три типа ионного состава, характерного для Свиного гирла. Морской – с доминированием (более 80 %) ионов натрия и калия, хлоридов и соленостью до 7–9 г/л. Донским водам соответствует низкая минерализация (менее 2 г/л), повышенная доля $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ (50–60 %), примерно равное количество SO_4^{2-} и HCO_3^- (по 30–40 %). С 2018 г. регулярно при понижении уровня регистрируется присутствие вод грунтового типа. Это солончатые воды с содержанием солей более 5 г/л. Для них типично высокое содержание натрия и калия (более 60 %) и сульфат-ионов (60–80 %). При частых перепадах уровня воды могут возникать смеси вод разного происхождения: морской и грунтовой, грунтовой и речной или смесь всех типов вод. Такие комбинации отличаются друг от друга своеобразным содержанием того или иного индикаторного иона и минерализацией.

Начальный период наблюдений, 02.02.2022 г., соответствовал стадии экстремальной верховки и уровням воды 30–35 см по уровнемерной рейке, то есть на 150 см ниже нормального (рис. 2). В этих условиях обнажаются большие площади дна взморья Дона. Участки разгрузки верхних водоносных слоев берегов рек становятся различимы визуально. Для солончатых вод грунтового типа (минерализация более 5 г/л) при таком уровне зафиксировано резкое преобладание сульфат-ионов среди группы анионов с содержанием: SO_4^{2-} – 2497,6 мг/л, Cl^- –

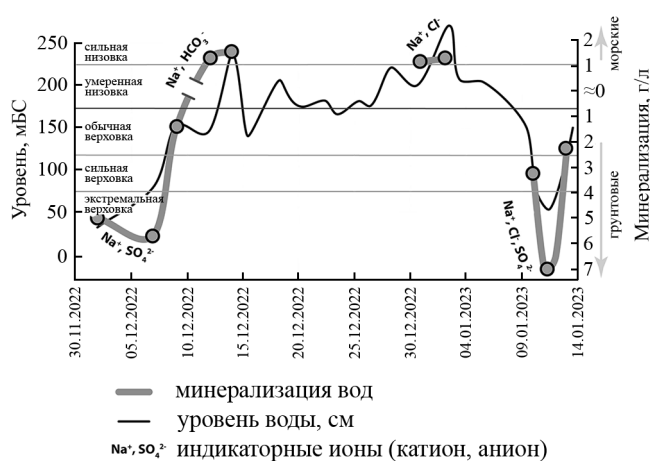


Рис. 2. Изменения минерализации, уровня воды и индикаторных ионов в южных протоках дельты Дона с 02.12. 2022 г. по 16.01.2023 г.

Fig. 2. Changes in mineralization, water level and indicator ions in the southern channels of the Don Delta from December 2, 2022 to January 16, 2023.

726,7 мг/л и HCO_3^- – 441,8 мг/л. Среди катионов наибольшее содержание получено для натрия и калия (1043 мг/л). Содержание ионов Mg^{2+} и Ca^{2+} составило 265,1 и 344,7 мг/л соответственно.

Вторая серия проб отобрана 07.12.2022 г. при уровне воды 78–80 см уровнемерной рейки. Воды отличались ярко выраженным натриево-сульфатным составом, процентное соотношение ионов аналогично предыдущему. Содержание ионов составило: SO_4^{2-} – 2689,7 мг/л, Cl^- – 744,5 мг/л, HCO_3^- – 458,9 мг/л, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ – 1188 мг/л, Ca^{2+} – 336,7 мг/л, Mg^{2+} – 245,6 мг/л.

Повышение уровня воды до 150–152 см рейки привело к проникновению пресных донских вод и понижению минерализации в пробах 09.12.2022 г. до 1,5–1,6 г/л. Изменился химический состав, выросла доля гидрокарбонатов (до 300,2 мг/л), хлорид-ионов наблюдалось только 212,7 мг/л. Содержание сульфатов составило 576,4 мг/л. Катионов зарегистрировано: $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ – 283 мг/л, Ca^{2+} – 128,3 мг/л, Mg^{2+} – 63,3 мг/л.

Через три дня, 12.12.2022 г., минерализация понизилась до 1,2 г/л при уровне воды 145 см. Ионов наблюдалось: SO_4^{2-} – 422,7 мг/л, Cl^- – 163,1 мг/л, HCO_3^- – 270,9 мг/л, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ – 236,0 мг/л, Ca^{2+} – 104,2 мг/л, Mg^{2+} – 38,9 мг/л.

Сильная низовка 14.12.2022 г. привела к росту уровня воды до 236 см. В подобных условиях подпор соленых морских вод формируется в прорези Азово-Донского морского канала и протоке Старый Дон. Пресный сток при этом заполняет боковые ру-

Таблица 3. Классификация гидрохимического состава вод в дельте Дона по уровням воды
Table 3. Classification of the hydrochemical composition of waters in the Don Delta according to water levels

Место отбора Sampling point	Cl ⁻ мг/л mg/l	HCO ₃ ⁻ мг/л mg/l	SO ₄ ²⁻ мг/л mg/l	Ca ²⁺ мг/л mg/l	Mg ²⁺ мг/л mg/l	Na ⁺ + K ⁺ мг/л mg/l	Общая минерализация, г/л Mineralization, g/l	Уровень воды, см уровнемерной рейки Water level, cm of level gauge
Уровень 40–60 см / Water level 40–60 cm								
БНЭБ «Кагальник» / SEB “Kagalnik” 02.12.2022, 10:30	744,5	454,0	2401,5	336,7	239,6	1048,5	5,2	32
Причал НИС «Профессор Панов» Berth of the R/V “Professor Panov” 02.12.2022, 10:50	744,5	466,2	2209,4	328,7	214,0	1016	5,0	31
Свиное гирло / Svinoe arm 02.12.2022, 11:00	726,7	441,8	2497,6	312,6	211,6	1168,5	5,4	31
Азов, р. Дон, протока Азовка Azov, Don River, Azovka arm 11.01.2023	241,1	351,5	614,8	144,3	65,7	319	1,7	44
Причал НИС «Профессор Панов» Berth of the R/V “Professor Panov” 11.01.2023	1666	512,6	2497,6	328,7	250,5	1760	7,0	50
БНЭБ «Кагальник» / SEB “Kagalnik” 11.01.2023	1666	512,6	2497,6	328,7	274,8	1710	7,0	50
Свиное гирло / Svinoe arm 11.01.2023	1630	502,8	1873,2	312,6	260,2	1406	6,0	50
Кривое гирло / Krivoe arm 11.01.2023	2375	751,8	1392,9	320,6	194,6	1908	6,9	50
Протока Сунжа / Sunzha arm 11.01.2023	1453	497,9	2065,3	280,6	218,9	1504	6,0	50
Ерик Орнитологический Ornithological arm 11.01.2023	1134	654,1	1248,8	248,5	116,7	1168	4,6	50
Река Кагальник / Kagalnik River 11.01.2023	1666	522,3	2593,6	320,6	255,4	1814	7,2	50
БНЭБ «Кагальник», фонтан из-под льда / SEB “Kagalnik”, ice fountain 12.01.2023	1630	541,9	2209,4	408,8	250,5	1497	6,5	60
БНЭБ «Кагальник» / SEB “Kagalnik” 07.02.2023	638,1	424,7	1585,0	280,6	165,4	759,0	3,9	60
БНЭБ «Кагальник» / SEB “Kagalnik” 08.02.2023	779,9	495,5	2209,4	304,6	240,8	1028,0	5,1	40
Уровень 80–120 см / Water level 80–120 cm								
Хутор Дугино, протока Каланча Dugino village, Kalancha arm 12.01.2023, 14:38	170,1	349,0	461,1	124,3	58,4	228	1,4	90

Продолжение табл. 3

Место отбора Sampling point	Cl ⁻ мг/л mg/l	HCO ₃ ⁻ мг/л mg/l	SO ₄ ²⁻ мг/л mg/l	Ca ²⁺ мг/л mg/l	Mg ²⁺ мг/л mg/l	Na ⁺ + K ⁺ мг/л mg/l	Общая минерализация, г/л Mineralization, g/l	Уровень воды, см уровнемерной рейки Water level, cm of level gauge
Ерик Дугин / Dugin arm 12.01.2023, 15:08	354,5	288,0	211,3	104,2	58,4	228	1,2	90
Хутор Колузаево, р. Дон Koluzaevo village, Don River 12.01.2023, 15:29	198,5	363,8	422,7	136,2	55,9	224	1,4	90
Мертвый Донец / Mertvyi Donets arm 12.01.2023, 15:48	191,4	380,8	595,6	164,3	58,4	276	1,7	90
БНЭБ «Кагальник» / SEB «Kagalnik» 17.04.2023, 9:10	744,5	407,6	1392,9	248,5	201,9	692,0	3,7	90
Уровень 130–180 см / Water level 130–180 cm								
БНЭБ «Кагальник» SEB «Kagalnik» 09.12.2022, 9:00	212,7	300,2	576,4	128,3	63,3	283	1,6	152
Причал НИС «Профессор Панов» Berth of the R/V «Professor Panov» 09.12.2022, 9:50	202,1	305,1	576,3	128,3	73,0	257,5	1,5	151
Свиное гирло / Svinoye arm 09.12.2022, 9:30	202,1	302,7	528,3	140,3	51,1	261,5	1,5	150
БНЭБ «Кагальник» / SEB «Kagalnik» 12.12.2022	163,1	270,9	422,7	104,2	38,9	236,0	1,2	145
Причал НИС «Профессор Панов» Berth of the R/V «Professor Panov» 12.12.2022	744,5	458,9	2689,7	336,7	245,6	1188	5,7	145
Свиное гирло / Svinoye arm 12.12.2022	726,7	471,1	2593,6	296,6	270,0	1130,5	5,5	145
Свиное гирло / Svinoye arm 31.12.2022, 13:30	163,1	258,7	288,2	104,2	41,3	156,0	1,0	180
Свиное гирло, дно Svinoye arm, bottom 31.12.2022, 13:30	163,1	266,1	384,24	96,2	55,9	189,0	1,2	180
БНЭБ «Кагальник» / SEB «Kagalnik» 16.01.2023	191,4	300,2	441,9	148,3	34,1	233,0	1,4	180
БНЭБ «Кагальник» / SEB «Kagalnik» 30.03.2023	234,0	249,0	403,5	136,3	63,2	177,0	1,3	174
Уровень >200 см / Water level >200 cm								
БНЭБ «Кагальник» / SEB «Kagalnik» 14.12.2022	248,2	300,2	480,3	120,2	48,6	298	1,5	231
Причал НИС «Профессор Панов» Berth of the R/V «Professor Panov» 14.12.2022	248,2	322,2	461,1	112,2	53,5	297	1,5	236

Окончание табл. 3

Место отбора Sampling point	Cl ⁻ мг/л mg/l	HCO ₃ ⁻ мг/л mg/l	SO ₄ ²⁻ мг/л mg/l	Ca ²⁺ мг/л mg/l	Mg ²⁺ мг/л mg/l	Na ⁺ + K ⁺ мг/л mg/l	Общая минерализация, г/л Mineralization, g/l	Уровень воды, см уровнемерной рейки Water level, cm of level gauge
Свиное гирло / Svinoe arm 14.12.2022	255,2	285,6	461,1	112,2	55,9	282	1,5	226
БНЭБ «Кагальник» / SEB «Kagalnik» 02.01.2023, 14:08	226,9	268,5	365,03	96,2	51,1	235,0	1,2	247
БНЭБ «Кагальник» / SEB «Kagalnik» 21.02.2023	276,6	297,8	518,7	128,3	58,4	307,0	1,6	300
БНЭБ «Кагальник» / SEB «Kagalnik» 21.02.2023, 14:10	241,1	300,2	461,1	124,3	63,2	248,0	1,4	391
БНЭБ «Кагальник» / SEB «Kagalnik» 21.02.2023, 16:35	255,2	290,5	499,5	128,3	65,7	264,0	1,5	391
Порт Азов / Seaport «Azov» 21.02.2023, 17:40	184,3	297,8	345,8	116,2	51,1	182,0	1,2	391

кава, в том числе Свиное гирло, где производился отбор проб воды. Минерализация выросла незначительно, до 1,5 г/л, соотношение ионов, характерное для донского типа минерализации, не изменилось. Концентрации ионов составили: SO₄²⁻ – 480,3 мг/л, Cl⁻ – 248,2 мг/л, HCO₃⁻ – 300,2 мг/л, Na⁺+K⁺ – 298 мг/л, Ca²⁺ – 120,2 мг/л, Mg²⁺ – 48,6 мг/л. При понижении уровня воды до 180 см 31.12.2022 г. химический состав вод сохранился. До 1–1,2 г/л понизилась минерализация.

В начале января (02.01.2023 г.) наблюдалась сильная низовка (247 см). В пробах, отобранных в этот день, влияния вод с морским типом минерализации не обнаружено. С понижением уровня в последующие дни (10–12.01.2023 г.) до 50–70 см рейки произошел переход от донского типа минерализации. Резко выросла доля сульфатов (до 2496,6 мг/л). При этом соленые морские воды, покрывшие острова дельты Дона при нагоне, стекали через мелкие ерики в основные рукава. Образовались солончатые воды (содержание солей до 5,2 г/л) смешанного грунтового и морского типа минерализации. Характерной чертой таких вод является высокое содержание хлорид-ионов (1666 мг/л в точках у коренного берега и 2375 мг/л в наиболее близком к морю Кривом гирле). Концентрации остальных ионов равны: HCO₃⁻ – 512,6 мг/л, Na⁺ + K⁺ – 1710 мг/л,

Ca²⁺ – 328,7 мг/л, Mg²⁺ – 274,8 мг/л. В ряде случаев отбор воды проводился со льда. Возвращающаяся после прекращения верховки вода была через лунки фонтаном.

Ряд проб отобран 12.01.2023 г. в протоках Каланча, Старый Дон, а также в ручьях по правому коренному берегу Дона у вершины дельты (ручей балки Кульбакина и родники, питающие протоку Мертвый Донец) (рис. 1). Воды основных проток соответствовали пресным речным и характеризовались донским типом минерализации. Воды родников были слабосолоноватыми и соответствовали грунтового типа минерализации [6].

Серия измерений закрыта 16.01.2023 г. при уровне воды 180 см и донском типе минерализации (1,4 г/л). Воды имели следующий ионный состав: SO₄²⁻ – 441,9 мг/л, Cl⁻ – 191,4 мг/л, HCO₃⁻ – 300,2 мг/л, Na⁺ + K⁺ – 233,0 мг/л, Ca²⁺ – 148,3 мг/л, Mg²⁺ – 34,1 мг/л.

В качестве реперной точки, для которой накоплено больше всего наблюдений, выбран причал на БНЭБ «Кагальник». Наглядная динамика уровня, минерализации и ионного состава представлена в таблице 2. Минимальным уровням воды соответствует максимальное содержание сульфатов и натрия + калия. С ростом уровня растет содержание гидрокарбонатов и понижается содержа-

ние сульфат-ионов. Падает общая минерализация. С дальнейшим ростом уровня в дельту проникают воды, насыщенные хлоридами. Влияние морских вод ощущается еще продолжительное время после прекращения нагона в виде стока солоноватых и высокосолоноватых морских вод с островов. Смешанные воды имеют максимальную минерализацию за счет присутствия насыщенных грунтовых и морских вод.

В таблице 3 все измерения сгруппированы по уровню воды. Подтверждена зависимость между минерализацией и аномальным высоким или низким уровнем воды. Выделены следующие группы вод. При минимальном уровне (40–60 см) наблюдаются солоноватые воды (5–7 г/л) натриево-сульфатного состава. После сильных нагонов в качестве второго по концентрации аниона выделяется ион Cl^- с долей 35–37 %.

На отметке 150 см происходит перестроение режима минерализации. Донские воды распресняют Свиное гирло и другие южные рукава дельты Дона. Наблюдаются общее понижение минерализации и рост количества гидрокарбонатов до 28–30 %, характерные для донских вод.

Во время эксперимента 02.12.2022–16.01.2023, несмотря на достаточно высокие отметки уровня воды при нагоне (до 247 см), чисто морского типа минерализации не обнаружено. Ранние наблюдения показывают, что воды такого типа заполняют непосредственно протоки дельты при экстремальных нагонах (более 400 см рейки, или более 2 м подъема уровня воды).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены новые результаты исследования изменений гидрохимического режима дельты Дона в условиях аридизации климата. Раскрыта динамика изменений характерных типов ми-

нерализации при быстрых перепадах уровня воды. Выделены основные типы, отличающиеся анионами: грунтовый тип минерализации (SO_4^{2-} более 70 %, общее содержание солей 5–7 г/л), морской (Cl^- 70–80 %, общее содержание солей до 8 г/л) и донской (30–40 % HCO_3^- -ионов, пониженная до 1–1,5 г/л минерализация). При чередовании серий верховок – низовок формируются смешанные воды: с повышенными долями хлоридов при доминировании грунтовой воды и верховках после нагонов, а также гидрокарбонатов в условиях распреснения грунтовых вод при подъеме уровня воды после экстремальных сгонов.

Аномальное маловодье Дона приводит к формированию ранее неизвестных геохимических зависимостей на разных участках бассейна. Необходимо более обширная сеть мониторинга в дельте, так как неизвестно, как осолонение бассейна проявляется в районах забора воды для городского водоснабжения и на разных участках обитания гидробионтов [15]. Восстановление утраченной сети гидропостов позволит приспособиться к дефициту водных ресурсов, а также получить обоснованные рекомендации для природопользования в современных условиях.

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) и НИР «Анализ исторических данных с целью обоснования системы мониторинга биогеохимических циклов в бассейне Азовского моря с учетом региональных особенностей» (Соглашение №72-223/ВИПГЗ-23 от 03.04.2023 г. между ИО РАН и ЮНЦ РАН в рамках Консорциума 2 по гранту № 169-15-2023-002 от 01.03.2023 г. Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б. 2013. Современные изменения водного режима рек в бассейне Дона. *Водные ресурсы*. 40(6): 544–556. doi: 10.7868/S0321059613060047
2. Труды Южного научного центра Российской академии наук. Том VII: Природные и антропогенные факторы в трансформации экосистемы Западного Маныча. 2018. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 256 с.
3. Матишов Г.Г., Григоренко К.С. 2018. Маловодье и роль грунтовых вод в осолонении авандельты Дона. *Доклады Академии наук*. 483(4): 442–446. doi: 10.31857/S086956520003284-5
4. Матишов Г.Г., Григоренко К.С., Булышева Н.И., Московец А.Ю. 2021. Новые данные о роли подземных и черноморских вод в Азово-Донском бассейне в период маловодья. *Наука Юга России*. 17(2): 34–48. doi: 10.7868/S25000640210204
5. Бронфман А.М., Дубинина В.Г., Макарова Г.Д. 1979. *Гидрологические и гидрохимические основы продуктивности Азовского моря*. М., Пищевая промышленность: 288 с.
6. Бураева Е.А., Вардуни Т.В., Шиманская Е.И., Шерстнев А.К., Триболина А.Н. 2014. Комплексная оценка родников г. Ростова-на-Дону. *Вода: химия и экология*. 3(69): 19–25.
7. Никаноров А.М. 2011. *Региональная гидрохимия*. Ростов н/Д, НОК: 389 с.

8. Никаноров А.М. 2017. *Гидрохимия и методы исследования качества вод суши*. Ростов н/Д, изд-во ЮФУ: 572 с.
9. Бронфман А.М., Хлебников Е.П. 1985. *Азовское море. Основы реконструкции*. Л., Гидрометеиздат: 272 с.
10. Симов В.Г. 1989. *Гидрология устьев рек Азовского моря*. М., Гидрометеиздат: 328 с.
11. *Гидрометеорологический справочник Азовского моря*. 1962. Л., Гидрометеиздат: 856 с.
12. *Ресурсы поверхностных вод СССР, том 7. Донской район*. 1973. Л., Гидрометеиздат: 459 с.
13. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том V. Азовское море*. 1991. СПб., Гидрометеиздат: 236 с.
14. Мамаев О.И. 1987. *Термохалинный анализ вод Мирового океана*. Л., Гидрометеиздат: 296 с.
15. Бергер В.Я. 1986. *Адаптации морских моллюсков к изменениям солености среды*. Л., Наука: 218 с.
5. Bronfman A.M., Dubinina V.G., Makarova G.D. 1979. *Gidrologicheskie i gidrokhimicheskie osnovy produktivnosti Azovskogo morya*. [Hydrological and hydro-chemical bases of the productivity of the Sea of Azov]. Moscow, Pishchevaya promyshlennost': 288 p. (In Russian).
6. Buraeva E.A, Varduni T.V., Shimanskaya E.I., Sherstnev A.K., Tribolina A.N. 2014. [Comprehensive assessment of springs in the city of Rostov-on-Don]. *Voda: khimiya i ekologiya*. 3(69): 19–25. (In Russian).
7. Nikanorov A.M. 2011. *Regional'naya gidrokhimiya*. [Regional hydrochemistry]. Rostov-on-Don, NOK: 389 p. (In Russian).
8. Nikanorov A.M. 2017. *Gidrokhimiya i metody issledovaniya kachestva vod sushi*. [Hydrochemistry and methods of the quality of land waters investigating]. Rostov-on-Don, Southern Federal University: 572 p. (In Russian).
9. Bronfman A.M., Khlebnikov E.P. 1985. *Azovskoe more. Osnovy rekonstruktsii*. [The Sea of Azov. Basics of reconstruction]. Leningrad, Gidrometeoizdat: 272 p. (In Russian).
10. Simov V.G. 1989. *Gidrologiya ust'ev rek Azovskogo morya*. [Hydrology of the river mouths of the Sea of Azov]. Moscow, Gidrometeoizdat: 328 p. (In Russian).
11. *Gidrometeorologicheskii spravochnik Azovskogo morya*. [Hydrometeorological reference book of the Sea of Azov]. 1962. Leningrad, Gidrometeoizdat: 856 p. (In Russian).
12. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR, tom 7. Donskoy rayon*. [Surface water resources of the USSR, volume 7. Don region]. 1973. Leningrad, Gidrometeoizdat: 459 p. (In Russian).
13. *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey SSSR. Tom V. Azovskoe more*. [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Volume V. The Sea of Azov]. 1991. St Petersburg, Gidrometeoizdat: 236 p. (In Russian).
14. Mamaev O.I. 1987. *Termokhalinnyy analiz vod Mirovogo okeana*. [Thermohaline analysis of the waters of the World Ocean]. Leningrad, Gidrometeoizdat: 296 p. (In Russian).
15. Berger V.Ya. 1986. *Adaptatsii morskikh mollyuskov k izmeneniyam solenosti sredy*. [Adaptations of marine mollusks to changes in salinity of the environment]. Leningrad, Nauka: 218 p. (In Russian).

REFERENCES

1. Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B. 2013. Current changes in river water regime in the Don River basin. *Water Resources*. 40(6): 573–584. doi: 10.1134/S0097807813060043
2. *Trudy Yuzhnogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. Tom VII: Prirodnye i antropogennye faktory v transformatsii ekosistemy Zapadnogo Manycha*. [Proceedings of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences. Volume VII: Natural and anthropogenic factors in the transformation of the Western Manych ecosystem]. 2018. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 256 p. (In Russian).
3. Matishov G.G., Grigorenko K.S. 2018. Water scarcity and the role of groundwater in salinization of the Don avandelta. *Doklady Earth Sciences*. 483(2): 1528–1533. doi: 10.1134/S1028334X18120073
4. Matishov G.G., Grigorenko K.S., Bulysheva N.I., Moskovets A.Yu. 2021. [New data about the function of underground and Black Sea waters in the Azov-Don basin during the lack of water period]. *Nauka Yuga Rossii*. 17(2): 34–48. (In Russian). doi: 10.7868/S25000640210204

Поступила 19.04.2023