

Гидролого-гидрохимический режим гиперсоленого озера Кояшского (Керченский полуостров)

Н. Н. Дьяков*, Ю. А. Мальченко, А. Е. Липченко

ФГБУ «Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова»,
Севастополь, Россия
*e-mail: dyakoff@mail.ru

Аннотация

Ландшафтной особенностью Крыма и Керченского полуострова является наличие большого числа гиперсоленых озер и заливов, многие из которых представляют собой ценные резерваты лечебных грязей. Цель статьи – обобщить результаты гидролого-гидрохимических экспедиционных исследований Севастопольского отделения ФГБУ «ГОИН» за 2015–2022 гг. в районе гиперсоленого озера Кояшского, расположенного в пределах природного заповедника «Опукский». Гидрологические исследования озера включали определение его морфометрических характеристик и расчеты основных компонент водного баланса. Гидрохимические исследования состояли из анализа проб рапы и донных отложений. Минерализацию вод озера измеряли различными методами. Кроме того, в отобранных пробах определяли следующие показатели: содержание растворенного кислорода и биохимическое потребление кислорода за пять суток, водородный показатель и общую щелочность, содержание биогенных элементов и загрязняющих веществ (анионных поверхностно-активных веществ, нефтепродуктов, тяжелых металлов). Оценивали микроэлементный состав рапы и загрязнение донных отложений. Определено, что приходная часть водного баланса озера формируется преимущественно за счет атмосферных осадков и фильтрации вод Черного моря через пересыпь. Основной расходной частью водного баланса является испарение. В ходе натурального эксперимента с помощью наземного испарителя ГГИ-3000 и автоматической метеостанции получены оценки испарения для гиперсоленых вод и определена формула для его расчета. Выявлено, что воды озера Кояшского характеризуются высокими значениями концентраций неорганических форм фосфора и азота. В летний период возможно понижение концентрации кислорода вплоть до гипоксических значений. Донные отложения озера были загрязнены цинком, концентрация которого превышала предельно допустимую концентрацию.

Ключевые слова: озеро Кояшское, природный заповедник Опукский, водный баланс, термохалинная структура, гидрохимический режим, Крымский полуостров, соленые озера

Благодарности: работа выполнена по теме государственного задания 3.1.2 ЦНТП Росгидромета «Разработка методических рекомендаций по учету климатической информации при формировании отраслевых планов адаптации к изменению климата».

© Дьяков Н. Н., Мальченко Ю. А., Липченко А. Е., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Авторы благодарят сотрудников Севастопольского отделения (СО) ФГБУ «ГОИН»: А. А. Полозок – за помощь в расчете площадей озера, О. В. Левицкую – за помощь в редактировании текста, А. А. Белогудова – за оформление рисунков, С. А. Жилиева – за отбор проб, С. А. Боброву и В. Ю. Еркушова – за проведение гидрохимических анализов.

Для цитирования: Дьяков Н. Н., Мальченко Ю. А., Липченко А. Е. Гидролого-гидрохимический режим озера Кояшского // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 2. С. 21–48. EDN VDSWWQ. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-21-48

Hydrological and Hydrochemical Regime of Hypersaline Koyashskoye Lake (Kerch Peninsula)

N. N. Dyakov*, Yu. A. Malchenko, A. E. Lipchenko

*Sevastopol Branch of the Federal State Budgetary Institution
“N.N. Zubov State Oceanographic Institute”, Sevastopol, Russia
e-mail: dyakoff@mail.ru

Abstract

A landscape feature of Crimea and the Kerch Peninsula is the presence of a large number of hypersaline lakes and bays, many of which are valuable reserves of therapeutic muds. The article summarizes the results of the hydrological and hydrochemical field studies conducted by the Sevastopol Branch of State Oceanographic Institute in 2015–2022 in the area of hypersaline Koyashskoye Lake located within Natural Reserve Opuksky. Hydrological studies of the lake included the determination of its morphometric characteristics and calculation of the main components of the water balance. Hydrochemical studies included the analysis of samples of brine and bottom sediments. The mineralization of the lake water was measured using different methods. Besides, the following indicators were identified in the samples: dissolved oxygen content and biochemical oxygen demand for five days, pH and total alkalinity, nutrient and pollutant (anionactive surfactants, petroleum, heavy metals) contents. The microelement composition of brine and pollution of bottom sediments were assessed. It was determined that the lake water balance input is formed mainly from atmospheric precipitation and filtration of the Black Sea water through the bay-bar. The major water balance output is evaporation. During an *in situ* experiment using a ground evaporator GGI-3000 and automatic weather station, evaporation for hypersaline waters was estimated and a formula for its calculation was determined. It was found that high concentrations of inorganic forms of phosphorus and nitrogen characterize the waters of Koyashskoye Lake. In summertime, oxygen concentrations can fall to hypoxic values. The bottom sediments of the lake were polluted with zinc, the concentration of which exceeded the maximum permissible concentration.

Keywords: Koyashskoye Lake, natural reserve Opuksky, water balance, thermohaline structure, hydrochemical regime, pollution

Acknowledgements: The work was performed on the topic of state assignment 3.1.2 of the Central Scientific and Technical Center of Roshydromet “Development of methodological recommendations for taking into account climate information in the formation of sectoral plans for adaptation to climate change”. The authors are grateful to the staff of the Sevastopol branch (SB) of SOI for their help: A. A. Polozok for calculating the area of the lake, O. V. Levitskaya for editing the text, A. A. Belogudov for arranging the drawings, S. A. Zhilyaev for sampling, S. A. Bobrov and V. Yu. Erkushov for hydrochemical analyses.

For citation: Dyakov, N.N., Malchenko, Yu.A. and Lipchenko, A.E., 2023. Hydrological and Hydrochemical Regime of Hypersaline Koyashskoye Lake (Kerch Peninsula). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 21–48. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-21-48

Введение

Ландшафтной особенностью Крыма является наличие большого числа соленых водоемов со специфическим составом вод и донных отложений [1]. К соляным (соленым, гиперсоленым) озерам, согласно работе¹⁾, принято относить озера, в которых содержание солей в воде превышает минерализацию океанических вод, т. е. больше 35 ‰. На территории Крыма находится около 300 соленых озер²⁾, из них 48 крупных соленых озер, 26 из которых имеют площадь более 1 км².

По происхождению котловин-ложбин, условиям питания и гидрологическому режиму соленые озера Крыма можно разделить на два типа: водоемы в котловинах морского и континентального происхождения.

По географическому месторасположению и наличию бальнеологических ресурсов гиперсоленые озера Крыма обычно разделяются на четыре основные группы: Перекопскую, Евпаторийскую, Керченскую и Тарханкутскую [1]. Некоторые авторы²⁾ выделяют еще дополнительно Херсонесскую и Присивашскую группы озер [2].

Наиболее многочисленными, разнообразными по происхождению и перспективными для хозяйственного использования являются гиперсоленые озера Керченской группы (рис. 1).

На Керченском полуострове расположен ряд небольших мелководных озер континентального происхождения – Марфовское, Киркояшское, Марьевское (Шимаханское, Борисово, Соленое), Ачи, Карач-коль, Парпач-Коль и др. К гиперсоленым озерам морского (лиманного) происхождения Керченской группы относятся озера, отшнурованные пересыпями в прибрежной зоне Черного моря, – Аджиголь, Качик, Узунларское и Кояшское. Еще два озера (Акташское и Чокракское) расположены вблизи побережья Азовского моря, и четыре соленых водоема (Янышское, Бальчи-коль, Тобечикское и Чурубашское) примыкают к Керченскому проливу.

Озеро Кояшское (Опукское, Элькинское, Элькенское), входящее в состав ГБУ Природный заповедник «Опукский» (ОПЗ), расположено у подножия Парпачского гребня на восточной окраине юго-западной равнины Керченского полуострова и представляет собой замкнутую лагуну [3]. Полное отчленение озера от Черного моря узкой песчаной косой произошло сравнительно недавно, менее 2 тыс. лет назад. Ранее, в античные времена, на берегу озера был расположен морской порт поселения Киммерик [4]. Озеро представляет собой устье затопленной балки, которая отсечена от Черного моря узкой пересыпью шириной около 30–80 м [1]. Размеры всего оз. Кояшского

¹⁾ Гроховский Л. М. Озерные месторождения солей, их изучение и промышленная оценка. Москва : Недра, 1972. 168 с.

²⁾ Ресурсы поверхностных вод СССР : Основные гидрологические характеристики. Т. 6. Украина и Молдавия. Вып. 4. Крым / Под ред. М. М. Айзенберга. Ленинград : Гидрометеиздат, 1964. 243 с.



Рис. 1. Основные гиперсолёные озера Керченской группы: континентального происхождения («коли») (красный цвет); морского (лиманного) происхождения бассейна Азовского моря (сиреневый цвет); бассейна Керченского пролива (синий цвет); бассейна Чёрного моря (серый цвет). 1 – Карач-коль, 2 – Ачи, 3 – Марфовское, 4 – Парпач-коль, 6 – Киркояшское, 7 – Акташское, 8 – Чокракское, 9 – Тобечикское, 10 – Чурубашское, 11 – Бальчи-коль, 12 – Янышское, 13 – Узунларское, 14 – Кояшское, 15 – Качик

Fig. 1. Major hypersaline lakes of the Kerch group: lakes of continental origin ("kols") (red colour); lakes of marine (liman) origin of the Sea of Azov basin (violet colour); of the Kerch Strait basin (blue colour); and of the Black Sea basin (grey colour). 1 – Karach-Kol, 2 – Achi, 3 – Marfovskoye, 4 – Parpach-Kol, 6 – Kirkoyashskoye, 7 – Aktashskoye, 8 – Chokrakskoye, 9 – Tobechikskoye, 10 – Churubashskoye, 11 – Balchi-Kol, 12 – Yanyshskoye, 13 – Uzunlarskoye, 14 – Koyashskoye, 15 – Kachik

при наибольшем заполнении, по данным [5, 6], следующие³⁾: длина – 3.9 км, средняя ширина 1.4 км, максимальная – 3 км, площадь ~ 5.4 км², глубина от 0.3 до 0.8 м (табл. 1). Водоем вытянут с северо-запада на юго-восток, и имеет овальную форму (рис. 2).

Озеро Кояшское состоит из ряда заливов (лагун), отсеченных песчаными косами (стрелками). В косах существуют прораны, через которые осуществляется водообмен между водоемами. В юго-западной части оз. Кояшского системой кос (стрелок) отсечено два залива (озера). Наибольшее из озер носит название Малое Элькинское, имеет площадь 0.83 км² и наибольшую длину 1.53 км при средней ширине 0.54 км. С северо-востока оз. Малое Элькинское отсечено от собственно оз. Кояшского безымянной косой, которую

³⁾ Поверхностные водные объекты Крыма. Управление и использование водных ресурсов : справочник / Под ред. А. А. Лисовского. Симферополь : КРП «Изд. Крымучпедгиз», 2011. 242 с.

мы предлагаем назвать косой Клюкина в честь А. А. Клюкина – известного исследователя Крыма и одного из создателей ОПЗ. Коса Клюкина имеет протяженность 1.1 км (табл. 2).

Ширина косы Клюкина в условиях максимального наполнения озера (без засух) составляет 40–70 м, в прикорневых частях она увеличивается до 100–160 м. В теле косы длительное время существует промоина шириной в среднем 400–480 м, через которую осуществляется водообмен между озерами Малым Элькинским и собственно Кояшским (рис. 3, *b*). В промоине периодически может появляться от одного до трех небольших островков.

Т а б л и ц а 1. Морфометрические характеристики оз. Кояшского

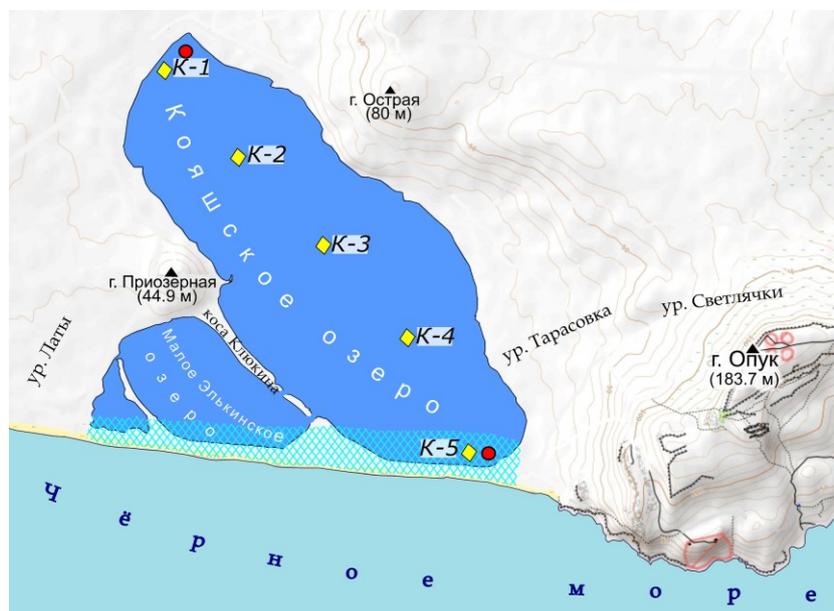
T a b l e 1. Morphometric characteristics of Koyashskoye Lake

Водоем / Waterbody	Длина макси- мальная, км / Maximum length, km	Ширина, км / Width, km		Площадь, км ² / Area, km ²	Глубина, м / Depth, m	
		средняя / mean	макси- мальная / maximum		средняя / mean	макси- мальная / maximum
Оз. Кояшское (без заливов) / Koyashskoye Lake (without bays)	3.70	1.20	2.00	4.45	0.5	0.8
Оз. Малое Элькинское / Maloye Elkinskoye Lake	1.53	0.54	0.78	0.83	0.2	0.3
Юго-западный залив / South-western bay	0.73	0.19	0.39	0.14	0.1	0.2
Юго-восточный залив / South-eastern bay	0.15	0.07	0.12	0.01	0.1	0.2
Всего оз. Кояшское / Koyashskoye Lake	3.90	1.40	3.00	5.43	0.3	0.8

Т а б л и ц а 2. Морфометрические характеристики кос и пересыпей оз. Кояшского

T a b l e 2. Morphometric characteristics of spits and bay-bars of Koyashskoye Lake

Аккумулятивная форма / Accumulation form	Длина макси- мальная, км / Maximum length, km	Ширина, км / Width, km		Площадь, км ² / Area, km ²
		средняя / mean	максимальная / maximum	
Коса Клюкина / Klyukina Spit	1.10	0.060	0.16	0.070
Коса Западная / Zapadnaya Spit	0.72	0.010	0.02	0.010
Коса Восточная / Vostochnaya Spit	0.10	0.006	0.01	0.001
Пересыпь на границе с морем / Bay-bar at the sea boundary	3.30	0.110	0.15	0.350



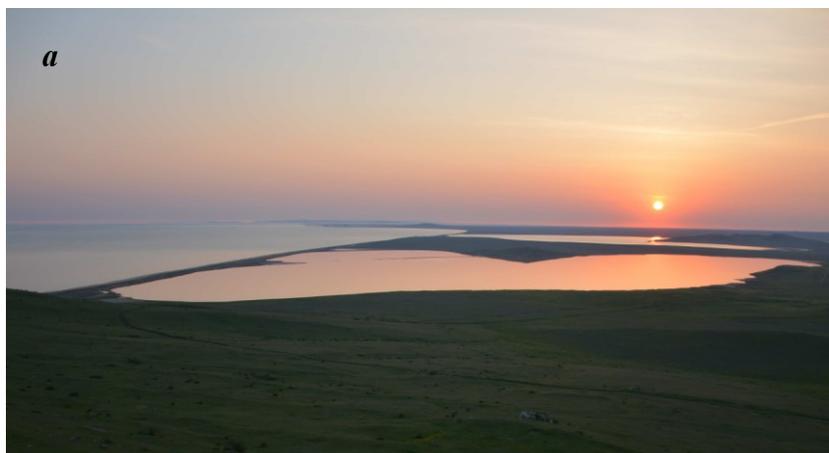
Р и с . 2. Карта-схема гиперсоленого оз. Кояшского: красные кружки – места отбора проб рапы; ромбы – точки отбора грязи; заштрихованная голубым цветом область – зона фильтрации морских вод

F i g . 2. Schematic map of hypersaline Koyashskoye Lake: red dots are for brine sampling points; diamonds are for mud sampling points; blue cross-hatched area is for the sea water filtration zone

Ширина промоины и количество островов в ней зависит от межгодовой и сезонной изменчивости составляющих водного баланса оз. Кояшского. За последние 40 лет промоина в косе увеличилась, при этом, как правило, наблюдались два острова. Интенсивность водообмена через протоку в теле косы Клюкина определяется уровнями рапы в оз. Кояшском и заливе (озере) Малое Элькинское, а также скоростью и направлением ветра.

По данным литологических разрезов [7], грунты дна залива (озера) Малое Элькинское примерно на 70 см в глубину сложены илами (грязями), ниже которых расположен слой раковинного детрита с илистым заполнителем. Коса Клюкина сложена преимущественно раковинным детритом со створками ракуши, но на глубинах 8–17 см и ниже 49 см располагается слой илов. Мощность накопленного ракушечного материала в теле косы Клюкина невелика $\sim 0.308 \cdot 10^{-3} \text{ км}^3$ [7]. Оз. Малое Элькинское пересыхает редко даже в засушливый период благодаря фильтрации морских вод через пересыпь, вода в нем всегда присутствует.

Западнее оз. Малого Элькинского коса Западная длиной 720 м и шириной 10–20 м отсекает еще один маленький юго-западный водоем (залив), большую часть года пересохший (рис. 3, с). Водообмен между юго-западным заливом и оз. Малым Элькинским осуществляется через узкую промоину (1–3 м) в северной прикорневой части косы Западной. Юго-западный водоем (залив) заполняется водой в основном благодаря фильтрации черноморской воды



Р и с . 3 . Озеро Кояшское (вид с горы Опук) 25 апреля 2019 г. (а); на переднем плане: юго-восточный водоем и коса Восточная, на среднем плане: оз. Кояшское, на заднем плане: коса Ключкина и оз. Малое Элькинское 17 сентября 2019 г. (b); коса Западная и юго-западный водоем, через проран в косе в небольших объемах поступает вода из оз. Малого Элькинского 27 апреля 2014 г. (с)

F i g . 3 . Koyashskoye Lake (a view from Mount Opuk) on 25 April 2019 (a); in the foreground: south-eastern waterbody and Vostochnaya Spit, in the middle: Koyashskoye Lake, in the background: Klyukina Spit and Maloye Elkinskoye Lake on 17 September 2019 (b); Zapadnaya Spit and south-western waterbody on 27 April 2014, through a passage in the spit, water comes on a small scale from Maloye Elkinskoye Lake (c)

через пересыпь, а также поступлению воды (рапы) в ограниченном объеме через узкий проран из оз. Малого Элькинского. На западе к юго-западному водоему в тыльной части пересыпи примыкает небольшое понижение (ров), в котором благодаря штормовому заплеску и фильтрации вод Черного моря скапливается морская вода, поступающая затем в водоем.

На противоположном участке пересыпи оз. Кояшского расположен еще один небольшой залив – юго-восточный водоем площадью 0.01 км^2 , длиной 150 м и средней шириной 70 м (см. табл. 1, рис. 3, b). Водоем отсечен от оз. Кояшского небольшой косой (стрелкой), именуемой Восточной. Ее длина 100 м, ширина 6–10 м. Водобмен юго-восточного водоема с оз. Кояшским осуществляется через 25-метровый проран в косе. Во время проведения исследований юго-восточный водоем был, как правило, пересохшим или в нем было небольшое количество воды (рапы).

Пересыпь оз. Кояшского вместе с заливами (озерами) Малым Элькинским и юго-западным имеет протяженность ~ 3.3 км и сложена песком, ракушей и детритом от псефитовой до алевритовой размерности [7]. В ракуше преобладают современные черноморские пелециподы и рапана. Подводный береговой склон пляжа приглубый, без вала (бара). В периоды штормов под ветро-волновым воздействием обычно находится полоса пляжа шириной 20–25 м. При экстремальных штормах волны, по данным [7, 8], могут перекрестывать пересыпь, достигая акватории оз. Кояшского, и забрасывать ракушу (раковины *Rapana venosa*, *Cardium edule*) и детрит в тыльную часть пересыпи. Во время проведения экспедиционных работ в 2016–2022 гг. мы не зафиксировали факты поступления черноморской воды через пересыпь озера при экстремальном штормовом волнении. Вблизи озера отсутствовали полосы бытового мусора, пластика, обычно выносимого при волнении, а ракуша была представлена единичными экземплярами *Rapana*, скорее всего занесенными сюда чайками. Согласно [8], пересыпь оз. Кояшского представляет собой типичный береговой бар, прошедший двухэтапный период образования. Благоприятные условия для формирования баров создаются во время замедления темпа повышения уровня моря, а преобразование подводного бара в островной, а затем в береговой происходит при последующем понижении уровня моря.

В 3 км южнее пересыпи оз. Кояшского из-под воды выступают так называемые Скалы-Корабли (Парус, Элькен-Кая, Эльчан-Кая, Каравия) высотой от 10.0 до 23.4 м над уровнем моря. Скалы-Корабли являются остатками размывших слоев мезотического ракушечно-детритусового известняка и наклонены в разные стороны под углами 30–85°. Они венчают подковообразную в плане банку, ограниченную изобатой 10 м. Глубина банки у скал составляет 5 м, в 500 м от них – 9 м, а на расстоянии 1000 м – 12–14 м [9].

Восточнее озера находится гора Опук высотой 183.7 м, одна из самых высоких на Керченском п-ове. Этой горой у берега Черного моря заканчивается Параболический гребень, являющийся продолжением Парпачского гребня [9]. На северном берегу оз. Кояшского расположена гора Острая с высотами 80.0–88.9 м. Берег в северной части озера на протяжении 500–650 м обрывистый, с высотами обрывов 5–10 м. На западном берегу оз. Кояшского расположена округлой формы гора Приозерная высотой 44.9 м и диаметром около 600 м.

Донные отложения представлены слоистыми черно-серыми илами толщиной до 1.5 м (с прослойками соли). Почти во все периоды экспедиционных работ СО ФГБУ «ГОИН» на оз. Кояшском наблюдалась розовая окраска соли, что связано с высоким содержанием бета-каротина и наличием большого количества цист *Dunaliella* [3]. Грязи оз. Кояшского имеют следующие гранулометрические характеристики: грубые илы (медианное значение 6.3 мкм, максимальный размер частиц 45 мкм) расположены рядом с песчаной береговой пересыпью; более тонкие илы (медианное значение 5.1 мкм, максимальный размер частиц 30 мкм) находятся в удаленных от берега районах озера. По своему минерально-солевому составу кояшские грязи сопоставимы с грязями Мертвого озера [6]. Балансовые запасы лечебных грязей составляют 1720.0 тыс. м³ по категории С1 [1]. В настоящее время рапа и грязи не эксплуатируются и могут являться резервом для использования их здравницами Крыма.

Материалы и методы

Всего за 2015–2022 гг. СО ФГБУ «ГОИН» в районе оз. Кояшского было проведено 30 экспедиций, выполнено 638 гидрохимических определений в рапе озера:

Год	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Число экспедиций	1	3	6	3	6	6	3	2
Число гидрохимических определений	11	34	94	52	142	150	89	66

На завершающем этапе исследований в 2020–2021 гг. был выполнен отбор и анализ проб донных отложений (грязей) со дна озера с целью исследования их химического состава и уровня загрязнения с целью оценки безопасности и потенциальной пригодности для использования в бальнеологических целях. На рис. 2 представлена карта оз. Кояшского с нанесенными точками отбора проб, включая сеть станций определения микроэлементного состава, данные о котором приводятся в работе³⁾.

Измерялись площади воды (рапы) и засух, а также изменения пересыпи озера. Для целей морфометрических и воднобалансовых исследований использовалась информация, полученная с искусственных спутников Земли серии *Landsat 4–5* разрешением 15–30 м и *Sentinel-2* (разрешение 10 м на пиксель для видимого диапазона) из открытых источников. Для дешифрации снимков (выделения водных объектов внутри суши и границы суша – море) использовалась методика комбинирования космических снимков в различных спектральных диапазонах, согласно [10, 11]. При анализе состояния соленых озер и лиманов обводненные грунты (ил – грязь) на осушаемой территории отображаются розовым цветом, что позволяет четко отделить их от водного зеркала водоема, которое отображается оттенками синего [10]. Дополнительно для большей точности дешифрации по возможности использовались выполненные специалистами СО ФГБУ «ГОИН» съемки с БПЛА и фотодокументация состояния поверхности озер во время проведения регулярных экспедиций.

Воднобалансовые исследования включали определение формулы водного баланса оз. Кояшского и оценки основных компонент баланса. Проводились расчеты количества атмосферных осадков, выпадающих на поверхность озера, для чего использовались уточненные морфометрические данные (см. табл. 1) и результаты измерений количества атмосферных осадков на ближайшей к озеру морской гидрометеорологической станции (МГ) Феодосия.

В основе большинства эмпирических формул, предложенных для расчета испарения с водной поверхности, лежит закон Дальтона – интенсивность испарения пропорциональна разности парциального давления водяного пара над этой поверхностью и функции скорости ветра:

$$E = C (e_0 - e_2) f(V_2),$$

где E – слой испарившейся воды, мм; $f(V_2)$ – некоторая функция скорости ветра на высоте 2 м над поверхностью водоема; C – эмпирический коэффициент; e_0 – упругость насыщения водяного пара воздуха над поверхностью

водоема при температуре воды, гПа; e_2 – фактическая упругость водяного пара воздуха на высоте 2 м над поверхностью водоема, гПа.

Из формул данного вида широко применяются эмпирические формулы В. С. Самойленко⁴⁾, Браславского – Викулиной [12], ГГИ⁵⁾, Браславского – Нургалиева и Шуляковского⁶⁾. Согласно работе⁵⁾, контрольные расчеты испарения, выполненные по формулам, предложенным различными авторами для 35 испарительных бассейнов, показали, что наименьшую среднеквадратическую погрешность (12.5 %) имеет формула Браславского – Викулиной, которая и была рекомендована в качестве расчетной в работе⁵⁾:

$$E = 0.14n (e_0 - e_2) (1 + 0.72V_2), \quad (1)$$

где n – число суток в месяце.

В 2020–2022 гг. в теплый период (апрель – ноябрь) мы провели эксперимент для расчета испарения вод гиперсоленых озер и заливов Крыма (оз. Кояшское, зал. Южный Сиваш). Фактическую интенсивность испарения рассолов определяли с помощью наземного испарителя ГГИ-3000; одновременно с дискретностью 15 мин регистрировали гидрометеорологические параметры с помощью автоматической метеостанции и высокоточного электронного термометра *LTA* (измеряли температуру воды в поверхностном слое испарителя).

Выполненный натурный эксперимент позволил получить уравнение связи между измеренными и рассчитанными величинами испарения. Предварительно наилучшее соответствие расчетных и экспериментальных данных дало применение формулы (1), при этом упругость насыщения водяного пара воздуха над поверхностью воды в испарителе вычислялась с учетом закона Рауля для растворенных веществ, так как согласно работе²⁾, с поверхности рапы гиперсоленого озера объем испарения на 30–40 % меньше, чем с поверхности пресного водоема. Формула (1) была использована для оценки месячных объемов испарения рапы Кояшского озера в 2006–2022 гг., при этом учитывались изменения площади водного зеркала озера в различные месяцы.

Гидрохимические исследования гиперсоленого оз. Кояшского включали в себя анализ проб рапы и донных отложений. Исследования проб проводили по соответствующим методикам выполнения анализа. Сразу после отбора выполняли определение температуры, плотности и величины рН воды, а также фиксацию растворенного кислорода, титриметрическое определение которого выполняли в передвижной лаборатории. Пробы на нефтепродукты (НП) консервировали четыреххлористым углеродом, пробы на анионные поверхностно-активные вещества (АПАВ) – хлороформом. Пробы на биогенные элементы замораживали без консервации, а на тяжелые металлы – консервировали азотной кислотой. Донные отложения охлаждали до температуры 5–6 °С

⁴⁾ Самойленко В. С. Современная теория океанического испарения и ее практическое применение // Труды ГОИН. 1952. Вып. 21. С. 3–31.

⁵⁾ Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Ленинград : Гидрометеоздат, 1969. 84 с.

⁶⁾ Винников С. Д., Проскураков Б. В. Гидрофизика (физика вод суши). Ленинград : Гидрометеоздат, 1988. 248 с.

и в течение суток доставляли в лабораторию ГАУ РК «Центр лабораторного анализа и технических измерений» для определения загрязнения их НП и тяжелыми металлами (хром, цинк, кадмий, медь, никель, свинец, кобальт, ртуть, мышьяк, стронций и железо). В дальнейшем в аттестованной Лаборатории химии моря СО ФГБУ «ГОИН» определяли следующие показатели:

- соленость вод (минерализация) и хлорность различными методами;
- общую щелочность;
- содержание биогенных элементов: нитратов, нитритов, фосфатов, кремния, общего азота и общего фосфора;
- содержание загрязняющих веществ: АПАВ, НП, тяжелых металлов.

При исследовании солености (минерализации) вод озер использовали различные физико-химические методы определения: ареометрирование (измерение плотности воды), рефрактометрию, аргентометрическое титрование, гравиметрию и кондуктометрию. Два последних метода были использованы в работе на финальной стадии исследований в 2019–2022 гг. Было проведено сравнение различных методов измерений солености, получены оценки ошибок и определен наиболее точный способ определения солености для гиперсоленого оз. Кояшского.

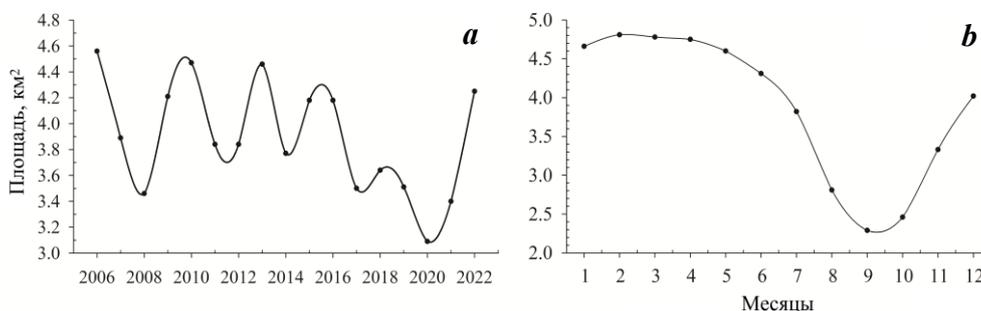
Результаты и обсуждение

Водный баланс. Результаты расчетов площади водного зеркала оз. Кояшского представлены на рис. 4. Видно, что площадь водного зеркала озера характеризуется значительной межгодовой и сезонной изменчивостью: от максимальных значений в феврале – апреле, до минимальных – в августе – октябре.

Уравнение водного баланса оз. Кояшского может быть записано в виде

$$\Delta B = V_{\text{ф}} + V_{\text{и}} + V_{\text{ос}} + V_{\text{сс}} - V_{\text{исп.}}$$

где ΔB – изменения уровня воды (рапы) в озере; $V_{\text{ф}}$ – черноморская вода, поступающая в водоем посредством фильтрации через пересыпь; $V_{\text{и}}$ – разгрузка подземных источников; $V_{\text{ос}}$ – атмосферные осадки; $V_{\text{сс}}$ – склоновый сток водосборного бассейна; $V_{\text{исп.}}$ – испарение.



Р и с . 4 . Межгодовой (а) и сезонный (b) ход площади водного зеркала оз. Кояшского

Fig . 4 . Interannual (a) and seasonal (b) variations of the surface water area of Koyashskoye Lake

Засушливость климата в районе оз. Кояшского определяет бедность территории пресными поверхностными и подземными водами [13]. Выходы подземных вод в гиперсоленые озера Керченской группы редки и невелики по дебету [5], ими можно пренебречь²⁾.

Склоновый сток в оз. Кояшское, скорее всего, тоже незначительный. Основной водоток происходит по безымянной балке длиной ~ 2 км, которая впадает в оз. Кояшское к северо-западу от г. Острой. За весь цикл выполненных нами исследований сток в озеро по этой балке отсутствовал или был незначительным. На горном массиве известен один постоянно действующий источник, собирающий в искусственную галерею воду эпикарстового горизонта, и около двух десятков сухих колодцев. Все они дренируют в обладающую высокими коллекторскими свойствами 50-метровую толщу мезотических известняков [13]. Дополнительным источником питания могут выступать конденсационные воды. По расчетам [14], конденсация на Опукском горном массиве может достигать 23 % от нормы осадков за год при модуле конденсационного стока за год $2.38 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{км}^2$.

Основной приток пресных вод в оз. Кояшское осуществляется за счет атмосферных осадков. В многолетнем ходе количества выпадающих атмосферных осадков в районе Керченского полуострова на фоне их значительной межгодовой изменчивости можно выделить периоды повышенного увлажнения в конце XX столетия и уменьшения количества осадков в 1950–1980-х гг., а также в последние годы (2006–2020 гг.). За весь период измерений на МГ Феодосия выявлена значимая тенденция к увеличению годовых и сезонных (кроме лета) сумм осадков. Однако за последний климатический период *ИМО* (1991–2020 гг.), а также после режимного сдвига 1976–1977 гг. (1978–2020 гг.) осадков стало выпадать существенно меньше (табл. 3, 4), особенно в весенний и осенний сезоны, для которых в Феодосии выявлены значимые тенденции к уменьшению количества осадков – минус 19.7 мм/10 лет и минус 24.0 мм/10 лет соответственно.

Аридизация климата Керченского полуострова обусловлена региональными особенностями глобальных климатических изменений в Северном полушарии. С 1990-х гг. по настоящее время в районе оз. Кояшского отмечаются значимые тенденции к повышению среднегодовых и среднемесячных значений температуры воздуха. В целом за многолетний период среднегодовые значения температуры воздуха на МГ Феодосия (станции с наиболее длительным рядом наблюдений в районе озера) имеют значимую тенденцию к повышению с величиной углового коэффициента линейного тренда $1.1 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ лет}$.

Сезонное распределение осадков в прибрежной зоне Керченского полуострова характерно для территорий с переходным типом климата (от морского к континентальному) умеренного пояса с максимумом осадков летом и зимой, минимумом – весной и осенью. За 2006–2022 гг. зимний максимум количества осадков, выпадающих на поверхность озера, составил 528 тыс. м³ или 33 % от суммы осадков за год (1623 тыс. м³). Он обусловлен наибольшей повторяемостью осадков и связан с тем, что в этот сезон Керченский полуостров находится под влиянием области повышенного давления на северо-востоке материка и циклонических вторжений с запада и юго-запада, приводящих к увеличению облачности и осадков. Летний, вторичный максимум осадков

Т а б л и ц а 3. Среднегодовое количество атмосферных осадков (ОС) и характеристики линейных трендов (мм/10 лет) среднегодовых сумм осадков на МГ Феодосия

Table 3. Long-term annual average amount of atmosphere precipitations (AP) and linear trend characteristics (mm/10 years) of annual average precipitation amounts at meteorological station Feodosiya

Период / Period	ОС, мм / AP, mm	Тренд, мм/10 лет / Trend, mm/10 years	R^2	$ t $	P_0	D_0
<i>Вековой ряд наблюдений / Long-term observational series</i>						
1870–2020	415	<u>12.0</u>	0.421	5.190	< 0.001	1.68
<i>Период после последнего режимного сдвига 1976–1977 гг. / Period after the last regime shift in 1976–1977</i>						
1978–2020	473	–8.1	0.096	1.722	0.100	1.56
<i>Последний период WMO / Last WMO period</i>						
1991–2020	476	–40.6	0.096	1.722	0.100	1.56

Примечание: жирным шрифтом выделены коэффициенты наклона трендов, значимые на уровне не ниже 95 %, подчеркнуты тренды, значимые на 99%-ном уровне; D_0 – критерий Дарбина – Уотсона.

Note: The numbers in bold are trend slope coefficients significant at no less than 95 level; the underlined numbers are trends significant at 99 level; D_0 – Durbin–Watson test.

Т а б л и ц а 4. Коэффициенты наклона линейных трендов (мм/10 лет) сезонных сумм атмосферных осадков по данным МГ Феодосия

Table 4. Linear trend slope coefficient (mm/10 years) for seasonal amounts of atmosphere precipitations according to the meteorological station Feodosiya's data

Сезоны / Seasons	Вековой ряд наблюдений (1870–2020 гг.) / Long-term observational series (1870–2020)	Период после последнего режимного сдвига 1976–1977 гг. / Period after the last regime shift in 1976–1977	Последний период WMO (1991–2020 гг.) / Last WMO period (1991–2020)
Зима / Winter	<u>2.1</u>	–2.5	–0.1
Весна / Spring	2.5	–6.4	–19.7
Лето / Summer	2.2	1.0	–7.0
Осень / Autumn	2.6	–2.0	–24.0

Примечание: жирным шрифтом выделены коэффициенты наклона трендов, значимые на уровне не ниже 95 %; подчеркнуты тренды, значимые на 99%-ном уровне.

Note: The numbers in bold are trend slope coefficients significant at no less than 95 level; the underlined numbers are trends significant at 99 level.

439 тыс. м³ (27 % от суммы осадков за год) обычно связан с развитием конвективной деятельности. В летние месяцы воздушные массы, приходящие с морской акватории, в наибольшей степени насыщены водяным паром, и на этот период года приходится максимум парциального давления. Весной и осенью, когда ослабевают градиенты давления, развивается местная циркуляция. Бризы, наблюдающиеся в этот период, осадков не приносят. В эти сезоны отмечаются минимальные значения объемов осадков, поступающих в оз. Кояшское, – 239 тыс. м³ (15 %) осенью и 417 тыс. м³ (25 %) в весенний сезон. На рис. 5 представлен многолетний сезонный ход количества выпавших атмосферных осадков (тыс. м³/мес.) по данным наблюдений на МГ Феодосия за 2006–2022 гг.

Испарение с поверхности озера является основной расходной частью его водного баланса. Среднемноголетнее значение испарения за рассматриваемый период составляет 3152 тыс. м³, т. е. почти в два раза превышает количество выпадающих осадков. Наибольшее количество воды испаряется в теплое время года (май – сентябрь) – 2466 тыс. м³ (78.2 %) (рис. 5).

Несмотря на повышение температуры воздуха в последние десятилетия и сокращение количества выпадающих атмосферных осадков, проведенные СО ФГБУ «ГОИН» исследования показали, что оз. Кояшское – одно из немногих гиперсоленых озер Керченского полуострова, которое почти никогда полностью не пересыхало. Так, в летние сезоны 2017 и 2020 гг. пересохли почти все соленые озера Керченского полуострова, за исключением озер Кояшского и Акташского.

Кроме атмосферных осадков, питание озера происходит за счет фильтрации морских вод Черного моря (в результате через пересыпь в озеро текут ручейки с водой значительно менее соленой, чем в озере). Причем сотрудники СО ГОИН впервые обнаружили, что в случаях интенсивной фильтрации (03.09.2017) соленость в районах озера, расположенных вблизи пересыпи, может уменьшаться до значений 19.7–20.9 ‰, т. е. близких к солености черноморской воды. Следует отметить, что отношение длины пересыпи к общей

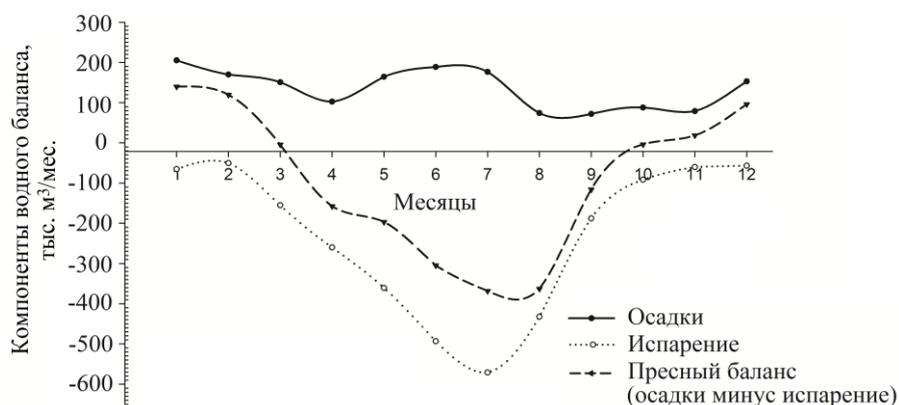


Рис. 5. Сезонный ход компонентов водного баланса оз. Кояшского

Fig. 5. Seasonal variations of water balance elements of Koyashskoye Lake

протяженности береговой линии оз. Кояшского является максимальным (0.39) по сравнению с аналогичным показателем для других больших лиманных озер Керченского полуострова – Узунларского (0.06), Тобечикского (0.09) и Чокракского (0.11). В выполненных ранее исследованиях указывалось, что в отдельные годы (2000, 2001, 2007 гг.) на значительной площади происходило осаждение соли [10]. При этом нередко на осевшей соли значительную площадь занимали полосы и пятна цветом от розового до красно-бурого. За период проведения работ в 2015–2022 гг. площадь осаждения соли (солончаков) находилась в пределах 2.8–3.8 км², высохших илов (засух) – 0.2–0.5 км². Минимальные площади водного зеркала 0.70–0.81 км² оз. Кояшского были отмечены в сентябре 2019 г. и октябре 2014 г., максимальное заполнение озера водой (площадь зеркала 5.0 км²) отмечалось в январе 2017 г.

В целом наименьшая площадь водного зеркала отмечалась в конце лета и начале осени и была обусловлена интенсивным испарением, уменьшением количества атмосферных осадков, а также фильтрацией через пересыпь вследствие снижения волновой активности в это время года. Выполненные нами промерные работы в летний сезон показали, что глубина озера летом не превышала 0.1–0.4 м.

Гидрохимический режим. Изученность показателей гидрохимического режима оз. Кояшского в настоящее время недостаточна. Наиболее полное исследование макрокомпонентного состава озера было выполнено в 1960-х гг.⁷⁾ По данным⁷⁾, при плотности рапы 1.224 г/см³ и суммарном содержании солей 26.54 вес. %, основными компонентами были NaCl, MgSO₄ и MgCl₂ – 20.06, 2.44 и 3.86 вес. % соответственно. Содержание других солей было существенно ниже – 0.1 вес. %.

Главной особенностью озера является высокое значение коэффициента метаморфизации (КМ) – величины отношения концентрации сульфата и хлорида магния, предложенного Н. С. Курнаковым⁷⁾ для оценки степени трансформации вод озер лиманного типа. Для сравнения: значение КМ вод Черного моря составляет 0.67. Близкое к этому значение КМ наблюдается в водах зал. Сиваш, а также озер, сохраняющих генетическую связь с морем (Чокракское и Тобечикское) или использующихся для упаривания морской воды при проведении соледобычи (Сакское). В других гиперсоленых озерах Крыма, утративших частично или полностью связь с материнским бассейном, значение КМ гораздо более низкое. Например, для расположенного рядом оз. Узунларского значение КМ составляет 0.25. Высокое значение КМ, близкое к значению этого показателя в морской воде, косвенно подтверждает существенную фильтрацию вод Черного моря через пересыпь и отсутствие значимого пресноводного стока, приводящего к обогащению водоема сульфатом магния.

Соленость, минерализация. Проведенные исследования показали, что соленость вод и их минерализация мало зависят от применяемого метода измерений почти во всем диапазоне значений. Только при значениях показателя, близких к показателям садки солей, отмечается снижение солености по отношению к величине, измеренной гравиметрическим методом (сухой остаток).

⁷⁾ Понизовский А. М. Соляные ресурсы Крыма. Симферополь : Изд-во «Крым», 1965. 162 с.

Наиболее близкие результаты к истинной величине солёности и минерализации даёт метод аргентометрического титрования, что вполне объяснимо, учитывая близость КМ к значениям черноморской воды.

В ряде проб мы зафиксировали случаи снижения солёности до «морских» значений или близких к ним. При этом, как правило, величина минерализации вод озера не зависела от используемого метода определения в пределах погрешности ареометрического определения плотности в сильно разбавленных растворах (табл. 5).

В целом концентрация солей в водах оз. Кояшского может изменяться в очень широких пределах – от 19.7 до 238.0 г/дм³. Случаи обнаружения экстремально низких значений солёности, как указывалось выше, связаны с фильтрацией морских вод. При этом из-за высокой плотности разбавляющие воды смешиваются не сразу, а образуют квазиустойчивые струи, которые в условиях отсутствия ветрового перемешивания могут существовать достаточно длительное время. Аномально низкая солёность вод, как правило, наблюдалась в весенний или осенний сезоны, когда озерная котловина почти полностью была заполнена водой и распресненные области были незаметны при визуальном осмотре. При сильном упаривании рапы до начала садки солей их часть выпадает в осадок, что и приводит к кажущемуся выводу об изменении КМ. При охлаждении воды и притоке морской воды соотношение солей восстанавливается до первоначального состояния.

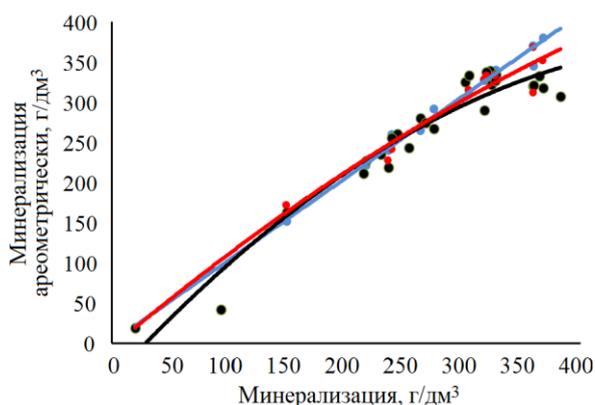


Рис. 6. Сравнение значений минерализации, полученных ареометрическим методом и определенных другими методами: аргентометрическим (синяя линия), гравиметрическим (черная линия), кондуктометрическим (красная линия) – в пробах, отобранных СО ФГБУ «ГОИН» за 2015–2022 гг.

Fig. 6. Comparison of mineralization values obtained by the densitometric method with those obtained by other detection methods: gravimetric method M(Gr) (black line); argentometric method M(Ag) (blue line); electrical conductivity method M(C) (red line) in samples taken by SB SOI for 2015–2022

Изменении КМ. При охлаждении воды и притоке морской воды соотношение солей восстанавливается до первоначального состояния.

Сравнение результатов измерения минерализации, выполненного различными методами, с результатами, полученными ареометрическим методом, представлено на рис. 6. Видно, что ареометрический метод даёт результаты, сопоставимые с результатами аргентометрического почти во всем диапазоне измеряемых величин. Небольшие отклонения наблюдаются только в области высоких значений минерализации. Аналогичный вывод может быть сделан и в отношении других использовавшихся методов измерения показателя, что подтверждает высказанное выше предположение о генетической близости вод оз. Кояшского и Черного моря.

Т а б л и ц а 5. Физико-химические показатели вод оз. Кояшского по данным съёмок СО ФГБУ «ГОИН» за 2015–2022 гг.

Table 5. Physical and chemical indicators of Koyashskoye Lake waters according to the data from SB SOI surveys for 2015–2022

Номер пробы / Sample number	Дата / Date	<i>T</i>	Показатели солевого состава рапы / Indicators of brine salt composition							
			ρ	M(Пл) / M(Ds)	n^{20}	M(Рф) / M(Rf)	Cl	<i>S</i>	M(Ag)	M(Гр) / M(Gr)
1	09.10.2015	13.0	1.150	215	н/о / N/D	н/о / N/D	118	184	212	н/о / N/D
2	13.04.2016	15.2	1.167	244	н/о / N/D	н/о / N/D	145	221	261	н/о / N/D
3	23.06.2016	37.2	1.209	323	н/о / N/D	н/о / N/D	189	278	339	н/о / N/D
4	14.08.2016	36.0	н/о	н/о	н/о / N/D	н/о / N/D	12	21	21	н/о / N/D
5	09.03.2017	14.8	1.175	254	н/о / N/D	н/о / N/D	136	208	244	н/о / N/D
6	26.04.2017	18.0	1.067	93	н/о / N/D	н/о / N/D	24	41	43	н/о / N/D
7	01.06.2017	26.1	1.201	302	н/о / N/D	н/о / N/D	181	268	326	н/о / N/D
8	17.07.2017	35.4	1.236	365	н/о / N/D	н/о / N/D	185	273	332	н/о / N/D
9	03.09.2017	31.0	1.010	20	н/о / N/D	н/о / N/D	11	20	20	н/о / N/D
10	13.10.2017	22.5	1.188	275	1.378	292	149	226	267	н/о / N/D
11	18.04.2018	23.0	1.178	263	1.374	265	156	236	280	н/о / N/D
12	01.06.2018	25.6	1.217	328	1.384	340	186	274	335	н/о / N/D
13	21.08.2018	25.5	1.252	383	1.392	406	171	255	307	н/о / N/D
14	06.02.2019	8.8	1.154	217	1.368	222	126	196	227	н/о / N/D
15	23.04.2019	19.0	1.158	230	1.370	235	131	203	236	н/о / N/D
16	31.05.2019	29.5	1.178	268	1.376	275	153	233	275	н/о / N/D
17	20.06.2019	37.0	1.216	324	1.383	332	179	266	322	н/о / N/D
18	17.09.2019	26.8	1.103	149	1.358	152	91	147	163	172
19	17.10.2019	15.0	1.245	368	1.389	380	177	261	318	352
20	15.01.2020	10.2	1.210	305	1.380	310	186	272	334	315
21	09.04.2020	18.5	1.216	320	1.383	330	188	275	338	333

Продолжение таблицы / Continued

Номер пробы / Sample number	Дата / Date	T	Показатели солевого состава рапы / Indicators of brine salt composition							
			ρ	M(Пл) / M(Ds)	n^{20}	M(Рф) / M(Rf)	Cl	S	M(Ag)	M(Гр) / M(Gr)
22	22.04.2020	17.6	1.215	318	1.382	327	162	242	290	328
23	29.05.2020	17.8	1.221	327	1.383	327	182	268	327	333
24	18.07.2020	36.0	1.235	360	1.388	371	178	265	321	368
25	28.10.2020	16.0	1.241	360	1.384	345	179	264	321	312
26	21.06.2021	31.5	1.160	239	1.374	260	142	219	255	241
27	06.08.2021	32.0	1.158	236	1.371	240	122	189	219	228
28	14.11.2021	13.0	1.222	330	1.382	327	188	275	338	355
29	16.02.2022	12.0	1.142	205	1.366	206	119	186	214	214
30	03.09.2022	27.0	1.169	252	н/о/ N/D	н/о/ N/D	179	265	321	341

Примечание: T – температура воды (°C); ρ – плотность рапы (г/см³); M(Пл) – минерализация (г/дм³) по плотности; M(Рф) – минерализация (г/дм³) по рефракции; Cl – концентрация хлорид-иона (г/дм³) аргентометрически; S – соленость (‰) аргентометрически; M(Ag) – минерализация (г/дм³) аргентометрически; M(Гр) – минерализация (г/дм³) гравиметрически; н/о – определения не выполнялись.

Note: T – water temperature (°C); ρ – brine density (g/cm³); M(Ds) – mineralization (g/cm³) by density; M(Rf) – mineralization (g/cm³) by refraction; Cl – chlorid ion concentration (g/dm³) by argentometry; S – salinity (‰) by argentometry; M(Ag) – mineralization (g/cm³) by argentometry; M(Gr) – mineralization (g/cm³) by gravimetry; N/D – determination was not performed.

Результаты исследований показателей гидрохимического режима вод (рапы) оз. Кояшского представлены в табл. 6.

Растворенный кислород. Концентрация растворенного кислорода в водах озера изменяется от гипоксических значений (1.1 мг/дм³, 15 % нас.) до 8.9 мг/дм³ (379 % нас.), но в целом на протяжении всего года концентрация растворенного кислорода была близка к насыщению при данной температуре и солености.

Нормальная аэрация поддерживается за счет абсорбции атмосферного кислорода и фотосинтеза, протекающего в приповерхностных слоях в колониях простейших водорослей (*Dunaliella* и др.). Учитывая, что большую часть года поверхность озера покрыта соляной коркой, следует предположить, что проникновение кислорода в приглубые слои воды осуществляется исключительно за счет диффузии, которая в условиях концентрированных рассолов большой плотности не может быть признана эффективным механизмом. У дна возможно образование гипоксических зон, в которых протекает гнилостное разложение отмершей биомассы. Как следствие этого, в толще вод могут накапливаться сероводород и сульфиды.

Периодическое развитие гипоксии в толще вод озера определяет и большой размах колебаний значений рН, который составляет 1.92 ед. рН (6.92–8.84 ед. рН). Низкие значения рН соответствуют высоким значениям общей щелочности, которая в данном типе проб определяется величиной

Продолжение таблицы / Continued

Номер пробы / Sample number	pH	Alk, ммоль/дм ³ / Alk, mmol/dm ³	БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³ / BOD ₅ , mgO ₂ /dm ³	растворенного кислорода / of dissolved oxygen		биогенных элементов*, мкг/дм ³ / of nutrients*, µg/dm ³							
				мг/дм ³ / mg/dm ³	% нас. / % sat.	PO ₄	P _{общ} / P _{tot}	SiO ₃ ²⁻	NO ₂	NO ₃	NH ₄	N _{общ} / N _{tot}	
													7.55
				8.65	1.693	5.9	7.55	113	29	572	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D
9	8.65	1.693	5.9	7.55	113	29	572	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	
10	7.66	8.657	9.9	0.95	41	533	1181	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	
11	8.11	6.065	26.9	8.91	379	147	423	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	
12	8.33	8.715	95.4	1.12	15	202	712	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	
13	6.92	22.35	97.6	н/о / N/D	н/о / N/D	1656	2779	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	
14	8.04	9.522	15.1	2.77	83	44	182	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	
15	8.09	1.462	8.3	2.68	97	65	232	1823	46	92	890	10450	
16	8.08	4.308	34.6	6.38	93	196	386	709	70	87	1577	4951	
17	7.80	4.768	53.9	н/о / N/D	н/о / N/D	55	588	1271	9	57	1333	19282	
18	8.01	25.200	13.5	2.85	80	619	828	1914	21	11	1826	10769	
19	7.56	29.500	13.9	1.85	91	46	6771	448	53	128	14	565	

Номер пробы / Sample number	pH	Alk, ммоль/дм ³ / Alk, mmol/dm ³	БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³ / BOD ₅ , mgO ₂ /dm ³	растворенного кислорода / of dissolved oxygen		биогенных элементов*, мкг/дм ³ / of nutrients*, µg/dm ³							N _{общ} / N _{tot}
				мг/дм ³ / mg/dm ³	% нас. / % sat.	PO ₄	P _{общ} / P _{tot}	SiO ₃ ²⁻	NO ₂	NO ₃	NH ₄		
20	7.93	7.117	62.9	0.42	19	448	965	1058	73	139	1631	3374	
21	7.64	7.407	18.4	1.62	89	215	691	2371	58	66	1681	6981	
22	7.67	7.198	20.6	2.20	111	211	634	654	55	202	1418	8097	
23	7.76	10.747	19.7	6.01	302	109	324	554	80	29	1904	11784	
24	7.07	25.734	21.5	2.58	175	765	2189	1247	107	447	3277	6681	
25	7.48	30.539	23.3	0.26	13	292	865	834	53	201	1657	14610	
26	8.25	2.005	34.5	4.93	226	233	288	662	44	43	883	7320	
27	7.11	5.787	110.3	н/о / N/D	н/о / N/D	582	356	765	163	18	478	4394	
28	7.73	5.001	119.6	2.46	86	292	869	679	104	7	121	9500	
29	7.80	5.147	2.4	2.38	68	243	475	1511	96	9	498	5598	
30	7.32	8.968	63.9	1.92	107	476	901	972	90	6	275	11700	

* Концентрация указана в пересчете на элемент.

* The concentration is given on element basis.

Примечание: Alk – щелочность; н/о – определения не выполнялись.

Note: Alk – alkalinity; N/D – determination was not performed.

не только гидрокарбонатной щелочности, но и гидросульфидной. При рассмотрении этих механизмов необходимо учитывать и то, что, несмотря на высокое насыщение вод кислородом, его концентрация остается низкой. Это создает благоприятные условия для протекания анаэробных процессов и продуцирования сероводорода, что определяет получение низких значений рН и высоких – общей щелочности.

Понижение концентрации растворенного кислорода во многом определяется ростом его потребления. Во всех проанализированных пробах наблюдалось повышенное значение БПК₅, многократно превышающее ПДК природных вод (2.1 мгО₂/дм³). Наиболее высокие значения БПК₅ наблюдаются в летний период и определяются избыточной продукцией солеустойчивых водорослей и бактерий. В этот период озеро становится эвтрофным водоемом, а в его водах сохраняются большие запасы биогенных элементов.

Концентрация *биогенных элементов* в водах оз. Кояшского связана главным образом с его водностью. Как видно из данных табл. 6, наиболее высокие значения концентрации общего фосфора наблюдались с июля по октябрь. При этом концентрации минеральных форм фосфора были минимальны. В остальное время года концентрации общего и минерального фосфора имели близкие значения. Такой характер сезонного распределения форм фосфора свидетельствует об активизации процессов ассимиляции фосфора фосфатного в жаркий период года. Большая его часть переходит в состав живого вещества в виде фосфорорганических соединений и находится во взвешенном состоянии. В дальнейшем органические формы из отмерших форм планктона и продуктов их жизнедеятельности частично выводятся в донные отложения, а частично минерализуются, восполняя убыль элемента. Анализ полученных данных свидетельствует о том, что, в отличие от морских и пресных поверхностных вод, максимум продуктивности которых приходится на весну и начало лета, микрофлора гиперсоленых озер, в частности оз. Кояшского, имеет максимальный уровень продукции в наиболее жаркое время года.

Аналогичный вывод может быть сделан и в отношении других биогенных элементов. Так, снижение концентрации растворенных форм *кремния*, как правило, наблюдалось летом, когда потребление элемента, необходимого для построения защитного покрова некоторых организмов и клеточных мембран, достигало максимума.

Концентрация *нитритного азота* почти во всех проанализированных пробах превышала ПДК и изменялась в пределах 7–447 мкг/дм³. Существенно более высокие значения концентрации наблюдались и для *аммонийного азота*, но в большинстве проанализированных проб превышения ПДК (2900 мкг/дм³) зафиксировано не было. И только в одной пробе, отобранной 18.07.2020, было обнаружено, что концентрация аммонийного азота составляет 1.1 от ПДК. Высокие значения концентрации (565–19 282 мкг/дм³) в оз. Кояшском характерны и для *общего азота*.

Совокупность перечисленных особенностей динамики различных форм азота свидетельствует о различии механизмов ассимиляции и трансформации азота в гиперсоленых озерах. В слабосоленых и пресных водах часть азота, попадающего в форме нитратов с поверхностным и подземным стоком, в процессе микробиологической денитрификации выделяется в атмосферу

в виде газообразных продуктов. В гиперсоленых озерах этот механизм затруднен ввиду отсутствия специфической микрофлоры, что создает благоприятные условия для накопления нитритов и продукции солей аммония и аминов, частично переходящих в донные отложения, которые являются источником вторичного загрязнения. При этом в зависимости от степени наполнения озерной котловины концентрация соединений азота в низшей степени окисления может изменяться на два и более порядка.

Состояние загрязнения вод Кояшского и других озер органическими ксенобиотиками изучалось в отдельных пробах. Работы не носили систематического характера вследствие методических затруднений при анализе проб с высокой соленостью. В пробах определяли АПАВ и НП. Несмотря на разбавление проб, в большинстве из них образовывалась устойчивая эмульсия, что не позволяло провести определение органических загрязняющих веществ. Было выполнено три определения АПАВ, результаты которых показали, что их концентрация изменялась в пределах 77–1200 мкг/дм³ при ПДК = 100 мкг/дм³ для вод рыбохозяйственных водоемов. Концентрация НП в единственной пробе, отобранной 01.06.2018, составила 0.06 мг/дм³ (1.2 ПДК). Учитывая невысокую техногенную нагрузку на озеро, расположенное в пределах особо охраняемой природной территории, можно констатировать, что его воды являются слабозагрязненными. Повышенные концентрации АПАВ могут быть обусловлены наличием природных поверхностно-активных веществ, образующихся в результате омыления жирных кислот.

Микроэлементный состав вод оз. Кояшского и загрязнение его вод солями тяжелых металлов в настоящее время изучены недостаточно. В работе [1] ссылаются на обследование, проведенное в 1970-х гг. с целью выявления запасов лечебных грязей²⁾. Нам не удалось найти более современные данные, поэтому в дальнейшем мы будем опираться на имеющиеся. Упомянутая выше работа была проведена на сети из четырех станций на разрезе по оси озера (см. рис. 1). Сравнительные результаты этого исследования и наших данных представлены в табл. 7.

Сравнение данных двух серий определений, проведенных в работе [1], и определений, выполненных СО ФГБУ «ГОИН», показывает, что в настоящее время концентрации всех элементов могут превышать ПДК. Особенно высокое превышение норматива наблюдается для меди и свинца. Вместе с тем концентрации всех элементов характеризуются высокой динамичностью и их значения часто изменяются на порядок.

Состояние загрязнения донных отложений. Исследование загрязнения донных отложений, которые потенциально могут использоваться в качестве лечебных грязей, мы провели 11.12.2020. Отбор проб выполняли в точке постоянного мониторинга, анализ – в аккредитованной лаборатории ГАУ РК «Центр лабораторного анализа и технических измерений». Официально значения ПДК загрязняющих веществ в донных отложениях в РФ не установлены, поэтому в качестве ориентировочных значений для нормирования качества донных отложений использовались *Neue Niederlandische Liste*⁸⁾.

⁸⁾ Warmer H., van Dokkum R. Water pollution control in the Netherlands. Policy and practice 2001. Lelystad, 2002. 77 p.

Т а б л и ц а 7. Микроэлементный состав (мкг/дм³) вод оз. Кояшского по данным [1] и данным мониторинга СО ФГБУ «ГОИИ», значения кларков элементов в океане [15, 16] и ПДК⁹⁾

Table 7. Microelement content (µg/dm³) of Koyashskoye Lake waters according to the data from work [1] and from monitoring by SB SOI, Clarke values of elements in the ocean [15, 16] and maximum permissible concentration (MPC)

Параметр / Parameter	Микроэлементы / Microelement								
	Zn	Cu	Ni	Pb	Sr	Cr	Co	Fe	Mn
С в точке: / C at point:									
К-1	< 0.05	3.07	< 0.1	< 0.02	<0.50	< 0.02	< 0.02	н/о / N/D	н/о / N/D
К-3	< 0.05	2.45	< 0.1	< 0.02	24.17	< 0.02	0.53	н/о / N/D	н/о / N/D
К-4	55.80	1.17	< 0.1	< 0.02	27.57	< 0.02	0.27	н/о / N/D	н/о / N/D
К-5	2.50	0.76	< 0.1	< 0.02	25.83	< 0.02	< 0.02	н/о / N/D	н/о / N/D
14	н/о / N/D	20.30	н/о / N/D	6.00	н/о / N/D	0.60	н/о / N/D	н/о / N/D	1.5
15	н/о / N/D	154.80	н/о / N/D	212.60	н/о / N/D	17.30	н/о / N/D	н/о / N/D	280.0
17	н/о / N/D	96.10	н/о / N/D	335.10	н/о / N/D	17.00	н/о / N/D	н/о / N/D	480.9
20	н/о / N/D	83.00	н/о / N/D	34.00	н/о / N/D	5.20	н/о / N/D	305.50	277.0
21	н/о / N/D	6.00	н/о / N/D	22.00	н/о / N/D	32.80	н/о / N/D	91.30	115.3
22	н/о / N/D	32.00	н/о / N/D	37.00	н/о / N/D	13.50	н/о / N/D	47.38	137.0
25	н/о / N/D	46.40	н/о / N/D	217.00	н/о / N/D	6.60	н/о / N/D	150.80	200.4
26	н/о / N/D	10.50	н/о / N/D	131.30	н/о / N/D	112.20	н/о / N/D	2567.90	129.6
27	н/о / N/D	64.60	н/о / N/D	49.30	н/о / N/D	313.30	н/о / N/D	997.10	391.5
28	н/о / N/D	53.10	н/о / N/D	38.10	н/о / N/D	238.30	н/о / N/D	1379.20	196.0
29	н/о / N/D	49.90	н/о / N/D	135.10	н/о / N/D	11.90	н/о / N/D	57.20	5.9

⁹⁾ Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2016 года № 552. URL: <http://agroportal2.garant.ru:81/document?id=71486774&byPara=1> (дата обращения: 25.05.2023).

Продолжение таблицы / Continued

Параметр / Parameter	Микроэлементы / Microelement								
	Zn	Cu	Ni	Pb	Sr	Cr	Co	Fe	Mn
Кларк* / Clarke*	4.90	0.50	1.7	0.03	200.00	0.20	0.05	20.00	0.2
ПДК* / MPC*	50.00	5.00	10.0	10.00	4140.00	20.00	5.00	50.00	50.0

* Значения ПДК элементов и их кларков в земной коре.

* Values of MPC of elements and of their Clarkes in the Earth's crust.

Примечание: C – концентрация; н/о – определения не выполнялись; жирным шрифтом выделены превышения ПДК.

Note: C – concentration; N/D – determination was not performed; values exceeding MPC are given in bold.

Показатели загрязнения донных отложений представлены в табл. 8. Высокий уровень загрязнения донных отложений элементами, для которых установлена ПДК по работе⁸⁾, наблюдался только для цинка. Для остальных элементов концентрация не превышала нормируемого значения. То же самое можно сказать и в отношении НП, концентрация которых была ниже принятого значения ПДК. Обращает на себя внимание и отношение полученных значений концентрации элементов к принятым значениям их кларков. Так, концентрация цинка и стронция превышала принятое значение кларка в два и три раза соответственно. С другой стороны, для железа, технофильность которого характеризуется достаточно высокими значениями, отношение к кларку составляло менее 0.5. Столь низкая концентрация железа, вероятно, объясняется специфичными особенностями окружающего ландшафта, так как почти вся территория полуострова входит в так называемый Керченский железорудный бассейн. В частности, в данном районе известны Кыз-Аульское и Новоселовское месторождения. Глубина залегания руд составляет 25–100 м,

Т а б л и ц а 8. Концентрация (мг/кг) загрязняющих веществ в верхнем слое донных отложений оз. Кояшского (в точке К-1)

Table 8. Pollutant concentration (mg/kg) in the surface layer of bottom sediments of Koyashskoye Lake (at K-1 point)

Параметр / Parameter	НП / OP	Cr	Zn	Cd	Cu	Ni	Pb	Co	Hg	As	Sr	Fe
Концентрация / Concentration	< 50	< 5	174	< 1	< 20	< 50	< 10	< 5	0.005	< 1	1114	19480
ПДК / MPC	50	–	140	0.80	35	35	85	н/о / N/D	0.300	29	н/о / N/D	н/о / N/D
Кларк / Clarke	–	83	83	0.13	47	58	16	18	0.08	1.7	340	46500

Примечание: н/о – определения не выполнялись; жирным шрифтом выделены превышения ПДК⁹⁾.

Note: N/D – determination was not performed; values exceeding MPC are given in bold.

и промывка этих районов, входящих в водосборный бассейн озер, приводит к повышению содержания железа в донных отложениях. В частности, в оз. Узунларском содержание железа в донных отложениях во время экспедиций СО ГОИН превышало 50 000 мг/кг. Столь существенное различие составов донных отложений близко расположенных озер может быть объяснено малым объемом поверхностного склонового стока в оз. Кояшское.

Заключение

На основании изложенного выше можно сделать следующие выводы:

1. Площадь водного зеркала оз. Кояшского характеризуется значительной межгодовой и сезонной изменчивостью: от максимальных значений в феврале – апреле, до минимальных в августе – октябре. Засушливость климата в районе оз. Кояшского определяет бедность территории пресными поверхностными и подземными водами. Склоновый сток в оз. Кояшском незначительный.

2. Основной приток пресных вод в оз. Кояшское осуществляется за счет атмосферных осадков. Сезонное распределение осадков в прибрежной зоне Керченского п-ова характерно для территорий с переходным типом климата (от морского к континентальному) умеренного пояса с максимумом осадков летом и зимой, минимумом – весной и осенью. За 2006–2022 гг. зимний максимум количества осадков, выпадающих на поверхность озера, составляет 528 тыс. м³ или 33 % от суммы осадков за год (1623 тыс. м³). Летний, вторичный максимум осадков 439 тыс. м³ (27 % от суммы осадков за год) обычно связан с развитием конвективной деятельности.

3. Кроме атмосферных осадков, из всех прочих приходных составляющих питание озера происходит в большей степени за счет фильтрации вод Черного моря (в результате через отделяющую от моря пересыпь в оз. Кояшское поступает вода значительно менее соленая, чем в озере). В случаях интенсивной фильтрации (03.09.2017) соленость в районах озера, приближенных к пересыпи, может уменьшаться до 19.7–20.9 ‰, т. е. близких к солености черноморской воды.

4. Сравнение изменений площади водного зеркала озера, полученных в результате анализа спутниковых снимков за 2006–2022 гг., с рассчитанными основными составляющими водного баланса оз. Кояшского (испарение, осадки, пресный баланс) показало, что основной вклад в формирование баланса в теплый период года вносит испарение. В холодный период года водный баланс озера определяется преимущественно осадками и фильтрацией черноморских вод через пересыпь.

5. Воды оз. Кояшского в большинстве проанализированных химических проб характеризовались хорошим насыщением кислородом. Тем не менее в летний период возможно понижение концентрации кислорода вплоть до гипоксических значений. Основной причиной этого является высокое значение БПК₅, которое во всех пробах превышало ПДК, установленную для морских вод.

6. Для рапы озера типичны высокие значения концентраций неорганических форм фосфора и азота. Вместе с тем в условиях гипоксии в водах образуется достаточно большое количество восстановленных форм азота (нитритного и аммонийного) и снижается концентрация нитратного азота.

7. Донные отложения оз. Кояшского загрязнены цинком, концентрация которого превышала установленные нормативы ПДК и кларк. Вместе с тем концентрация железа, которая превышала кларк в оз. Узунларском, в водах Кояшского составила только 0.5 от кларка. Это свидетельствует о небольшом объеме поверхностного склонового стока вод, поступающих в водоем, и о хорошей фильтрации черноморских вод через пересыпь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пасынков А. А., Соцкова Л. М., Чабан В. И. Экологические проблемы сохранения и использования бальнеологических ресурсов соленых озер Крыма // Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Серия «География». 2014. Т. 27, № 2. С. 97–117. EDN UMNKRH.
2. Anufriieva E., Holynska M., Shadrin N. Current invasions of Asian Cyclopidae species (Copepoda: Cyclopidae) in Crimea, with taxonomical and zoogeographical remarks on the hypersaline and freshwater fauna // Annales Zoologici. 2014. Vol. 64, iss. 1. P. 109–130. doi:10.3161/000345414X680636
3. Каротиноиды в красной соли гиперсоленого Кояшского озера (Крым, Черное море): предварительное сообщение / Н. В. Шадрин [и др.] // Морской экологический журнал. 2008. Т. 7, № 4. С. 85–87. EDN TYNYWR.
4. Голенко В. К. Древний Киммерик и его округа. Симферополь : Сонат, 2007. 408 с. EDN QPGZMF.
5. Каюкова Е. П. Изучение гидроминеральных ресурсов Восточного Крыма // Геология, геоэкология, эволюционная география : труды Международного семинара. Санкт-Петербург : Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2016. Т. XV. С. 60–64. URL: https://pureportal.spbu.ru/files/52582610/_2016_15.pdf (дата обращения: 14.05.2023).
6. Закономерности формирования состава иловых грязей Мертвого моря и соляных озер Крыма / И. К. Котова [и др.] // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2015. № 2. С. 85–106. EDN TYUXEZ.
7. Капралов А. А. Разнообразие растительных сообществ и их динамика на пересыпи Кояшского озера // Биоразнообразие природных заповедников Керченского полуострова : сборник трудов Государственного Никитского ботанического сада. 2006. Т. 126. С. 121–132. EDN SMKDFR.
8. Ястреб В. П. Возникновение древних и современных аккумулятивных форм в условиях новочерноморской трансгрессии // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2009. Вып. 20. С. 145–152. EDN XCIVQT.
9. Клюкин А. А. Природа и разнообразие факторов среды территории Опукского природного заповедника // Биоразнообразие природных заповедников Керченского полуострова : сборник трудов Государственного Никитского ботанического сада. 2006. Т. 126. С. 8–22. EDN UNTXQN.
10. Изучение водного режима озер-лиманов Керченской группы с применением спутниковых данных / Л. В. Харитоновна [и др.] // Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-Черноморского региона. Материалы VII Международной конференции. Керчь, 20–23 июня 2012 г. Керчь : ЮгНИРО, 2012. Т. 1. С. 200–206. EDN ZSFKKB.

11. *Боровская Р. В., Смирнов С. С.* Технология расчета площади водного зеркала с использованием данных, полученных с искусственных спутников Земли серии Sentinel-2, и ее применение для определения площадей соленых озер Крыма // Системы контроля окружающей среды. 2020. Вып. 40. С. 36–43. EDN VKHAPB. doi:10.33075/2220-5861-2020-2-36-43
12. *Шерешевський А. І., Синицька Л. К.* Сучасна оцінка розрахункового випаровування з водної поверхні дніпровських водосховищ з метою його врахування при розробці режимів роботи ГЕС // Труды УкрНДГМІ. Київ : УкрНДГМІ, 2006. Вип. 255. С. 213–228.
13. Проявления гипогенного карста в Опукском массиве на Керченском полуострове / А. Б. Климчук [и др.] // Спелеология и карстология. 2014. № 12. С. 57–68. EDN IROWKQ.
14. *Вахрушев Б. А., Вахрушев И. Б.* Заповедные объекты массива горы Опук и сопредельных территорий // Сборник трудов Государственного Никитского ботанического сада. 2006. Т. 126. С. 23–33. EDN UNTXQX.
15. *Перельман А. И.* Геохимия природных вод. Москва : Наука, 1982. 154 с.
16. *Кист А. А.* Феноменология биогеохимии и бионеорганической химии. Ташкент : Фан УзССР, 1987. 236 с.

Поступила 09.04.2023 г.; одобрена после рецензирования 30.04.2023 г.; принята к публикации 03.05.2023 г.; опубликована 26.06.2023 г.

Об авторах:

Дьяков Николай Николаевич, директор Севастопольского отделения ФГБУ «Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова» (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Советская, 61), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-2622-7695**, dyakoff@mail.ru

Мальченко Юрий Анатольевич, старший научный сотрудник, Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова» (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Советская, 61), **ORCID ID: 0000-0002-7422-2824**, mvr121@yandex.ru

Липченко Александр Евгеньевич, старший научный сотрудник, Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова» (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Советская, 61), **ORCID ID: 0000-0002-7840-7009**, lipch2015@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Дьяков Николай Николаевич – формулировка и постановка задачи, подготовка текста статьи

Мальченко Юрий Анатольевич – обработка и анализ гидрохимических данных, подготовка информации о гидрохимическом режиме

Липченко Александр Евгеньевич – водно-балансовые расчеты

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.