

ГИДРОХИМИЯ, ГИДРОБИОЛОГИЯ,  
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

УДК 628.19(285.32)(477.75)

**ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ  
НА СЕЗОННУЮ ЭКОГИДРОЛОГИЧЕСКУЮ ДИНАМИКУ  
ВОСТОЧНОГО БАСЕЙНА ГИПЕРСОЛЕННОГО САКСКОГО ОЗЕРА  
(РЕСПУБЛИКА КРЫМ)<sup>1</sup>**

© 2023 г. И. И. Руднева<sup>a</sup>, \*, В. В. Чабан<sup>b</sup>, \*\*, В. Г. Шайда<sup>c</sup>, А. Л. Корепанов<sup>d</sup>, \*\*\*

<sup>a</sup>Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011 Россия

<sup>b</sup>Крымская ГГРЭС, Саки, Республика Крым, 296500 Россия

<sup>c</sup>ООО “Экосервис А+”, Москва, 107140 Россия

<sup>d</sup>Севастопольский государственный университет, Севастополь,  
Республика Крым, 299053 Россия

\*e-mail: svg-41@mail.ru

\*\*e-mail: vic\_84@list.ru

\*\*\*e-mail: akorepanov2006@rambler.ru

Поступила в редакцию 21.04.2022 г.

После доработки 04.07.2022 г.

Принята к публикации 03.08.2022 г.

Крымские соленые озера обладают высоким ресурсным потенциалом, используемым в разных видах человеческой деятельности — бальнеологии, химической промышленности, терапии, а в настоящее время это привлекательные туристические объекты. Сочетание биотических и абиотических факторов создает специфические условия для развития и существования биоты и для формирования уникального ионного состава рапы и донных отложений, которые применяются в бальнеологии и в производстве спа-продуктов. Сакское озеро — одно из наиболее крупных приморских соленых озер Крыма, расположенных на юго-западном побережье Черного моря. В озере под воздействием климатических условий и биоты сформировалась специфическая экосистема, имеющая характерный меняющийся в течение года ионный состав рапы и популяцию артемии. Содержание катионов и анионов в рапе увеличивалось в летний период в результате интенсивного испарения и снижалось в зимне-весенний сезон вследствие разбавления воды атмосферными осадками и талыми водами. Динамика популяции артемии также имела характерные сезонные особенности: жизненный цикл начинался в апреле, максимальное число разных жизненных стадий отмечено в мае—июне и окончание в ноябре—декабре. Искусственная регуляция водно-солевого режима водоема путем добавления морской воды в летний период способствовала поддержанию оптимальных условий, что обеспечивало активную жизнедеятельность биоты. Полученные данные могут отражать сезонную динамику процессов в соленом озере, обусловленную климатическими, сезонными и антропогенными факторами.

*Ключевые слова:* гиперсоленые озера, Крым, катионы, анионы, коэффициент метаморфизации, сезонные изменения, артемия.

**DOI:** 10.31857/S0321059623010133, **EDN:** EDWXGP

## ВВЕДЕНИЕ

Гиперсоленые водоемы характеризуются сезонными циклическими флуктуациями физико-химических параметров, среди которых наиболее

значимые — температура, соленость, содержание растворенного кислорода и биогенов [27, 30, 34, 40]. Их постоянные колебания под действием специфических гидрометеорологических, гидрогеологических и гидрохимических факторов создают в таких водоемах особые условия для развития и функционирования биоты. При этом взаимодействии абиотических и биотических факторов в этих экосистемах приводит к формированию в них уникальных донных отложений — природных лечебных ресурсов. Их биоразнообразие крайне

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках государственного задания МГИ РАН (тема 0555-2021-0004 “Фундаментальные исследования океанологических процессов, определяющих состояние и эволюцию морской среды под влиянием естественных и антропогенных факторов, на основе методов наблюдения и моделирования”, шифр “Океанологические процессы”).



**Рис. 1.** Схема расположения контрольной точки отбора проб в Восточном бассейне оз. Сакского.

ограниченно организмами, приспособленными к существованию в экстремальных условиях, к которым относятся прежде всего артемия и ряд галофильных бактерий, жизненный цикл которых также зависит от сезонных изменений [15, 18, 19, 24, 37].

Сакское озеро – одно из наиболее крупных приморских соленых озер Крыма (рис. 1). Климатические и биологические условия сформировали в нем специфическую экосистему, характеризующуюся переменной соленостью в различные сезоны года, наличием лечебных грунтов и рапы, которые интенсивно применяются в бальнеологии, косметологии и фармацевтике. В озере обитает популяция артемии, состав и численность которой также подвержены межгодовым и сезонным флуктуациям. Минеральные ресурсы озера в течение долгих лет используются в галургической промышленности и в бальнеологии [2, 5, 13]. С учетом народно-хозяйственного значения гидроминеральных ресурсов оз. Сакского представляются важными и актуальными исследования их сезонной динамики, а также факторов, влияющих на физико-химические характеристики рапы и илов.

В настоящее время оз. Сакское разделено на семь изолированных друг от друга бассейнов, два из которых используются в лечебных целях, остальные выполняют защитную функцию, препятствуют загрязнению паводковыми и сточными водами. Для охраны и рационального использования ресурсов озера в условиях интенсивного антропогенного воздействия создана сложная гидротехническая система (ГТС) его защиты, состоящая из разделительных дамб, обводных каналов, насосных станций и вододелителей. С помощью этих конструкций от лечебных бассейнов отводятся пресные воды из защитных водоемов и с расположенных поблизости подтопляемых территорий. Для поддержания необходимой минера-

лизации рапы в жаркое время года посредством ГТС из Каламитского залива Черного моря подается морская вода, ее гидрохимические параметры имеют сходство с таковыми рапы лечебных водоемов. Таким образом, искусственно регулируется водно-солевой баланс, что в свою очередь обеспечивает поддержание физико-химических параметров гидроминеральных ресурсов в установленных пределах, а также создает благоприятные условия для развития гидробионтов, что имеет особо важное значение в летне-осенний период при повышении температуры воздуха и воды и интенсивном испарении [1, 11, 12]. Важнейшую функцию выполняет Восточный бассейн оз. Сакского – участок промышленной добычи природных гидроминеральных ресурсов – лечебных грязей и рапы. В связи с интенсивной эксплуатацией данного водного объекта, усилением антропогенной нагрузки на прилегающие к нему территории и реконструкцией набережной и коммуникационных сетей города возникает необходимость активного сезонного мониторинга гидроминеральных и биологических ресурсов Восточного бассейна с целью их сохранения и оптимального использования в дальнейшем.

Цель настоящей работы – изучение сезонной динамики физико-химических параметров рапы Восточного бассейна оз. Сакского в период интенсивной застройки его берегов летом 2019 г., а также структуры и численности обитающей в нем популяции артемии.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### *Описание объекта исследования*

Площадь водного зеркала Восточного бассейна оз. Сакского составляет 1,27 км<sup>2</sup>. Максимальные глубины (0,7–2,0 м) зафиксированы в восточной части бассейна в районе добычи лечебных грязей. Среднеголетний уровень водоема –1,02 м абс. При регулировании водного баланса Восточного бассейна необходимо стремиться к поддержанию оптимального уровня рапы в диапазоне от –0,8 до 1,05 м абс.

На протяжении последних пятидесяти лет Восточный бассейн оз. Сакского, участок добычи пелоидов (лечебных иловых сульфидных грязей) и озерной рапы был почти полностью исключен из естественной системы питания поверхностными и грунтовыми водами и привносимыми ими продуктами почвенной эрозии. В результате этого водоем практически трансформировался в грязевой бассейн, в котором геохимическая функция литосферы оказывает незначительное влияние на процесс формирования донных отложений, вследствие чего произошло некоторое приостановление естественного грязеобразования в последние годы [10].

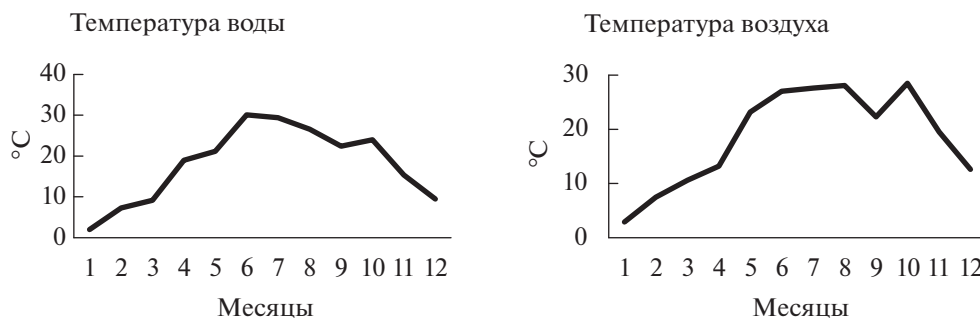


Рис. 2. Сезонные колебания температуры воздуха и рапы в Восточном бассейне оз. Сакского 2019 г.

### Методы исследования

Пробы рапы отбирали ежемесячно в 2019 г. в контрольной точке Восточного бассейна оз. Сакского (рис. 1). Определение содержания гидрокарбонат-иона проводили титриметрическим методом с помощью 0.1 Н раствора соляной кислоты с индикатором метиловый оранжевый. Для анализа содержания карбонат-ионов применяли тот же метод, используя в качестве индикатора фенолфталеин. Содержание ионов кальция определяли комплексометрическим методом титрования с трилоном Б с индикатором мурексидом. Содержание иона магния определяли комплексометрическим методом в присутствии кальция с индикатором хромом темно-синим. Хлорид-ион определяли меркурометрическим методом титрования с азотнокислой ртутью(II) со смешанными индикаторами – дифенил карбазон и бромфеноловым синим. Сульфат-ион определялся гравиметрическим методом. Для определения ионного состава указанными методами использовали лабораторные весы “AXIS” типа “VTU210” и “AND” типа “HR-150AZ”, спектрофотометр “СПЕКОЛ-11” и колориметр “КФК-2”. Определение суммы ионов натрия и калия проводили расчетным методом. Указанные лабораторные исследования проведены на базе Центральной испытательной лаборатории Крымской ГПР-ЭС по типовым методикам в соответствии с действующими нормативными документами [3, 8, 9].

pH, окислительно-восстановительный потенциал Eh и содержание кислорода оценивали в лабораторных условиях при помощи анализатора “Expert-001” (“Econix-Expert Моеха CoLtd”, Россия) с использованием соответствующих селективных электродов (“Вольта”, Россия). Соленость воды измеряли с помощью рефрактометра “PAL-06S” (“LTA GO”, Япония). Измерения проводили при комнатной температуре в трех повторностях, вычисляли среднее значение. Рассчитывали коэффициент метаморфизации ( $K_m$ ) – величину, характеризующую степень отклонения солевого состава природных вод от состава нор-

мальной морской воды, – как соотношение содержания сульфатов магния и хлоридов магния по следующей формуле:

$$K_m = \frac{MgSO_4}{MgCl_2}$$

Исследование жизненных стадий популяций артемии проводили путем отбора проб рапы с помощью специального устройства объемом рабочей части 5 л. Пробы концентрировали с использованием мелкоячеистого фильтра и подсчитывали разные жизненные стадии рачка под бинокулярным микроскопом “МБС-9”, показатели – среднее из трех определений, экз/л [7].

Корреляции между исследованными показателями вычисляли с помощью компьютерной программы CURFVIT (версия 2).

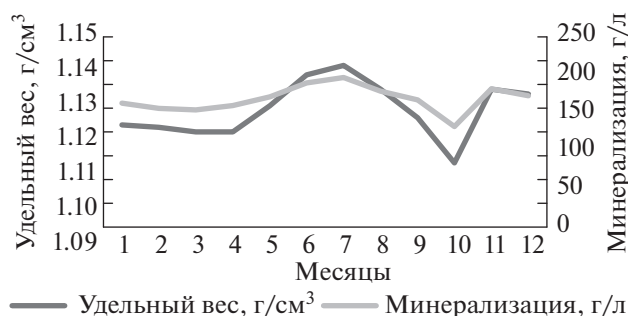
### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты исследований позволили установить характерную сезонную динамику метеорологических и гидрохимических параметров для Восточного бассейна оз. Сакского.

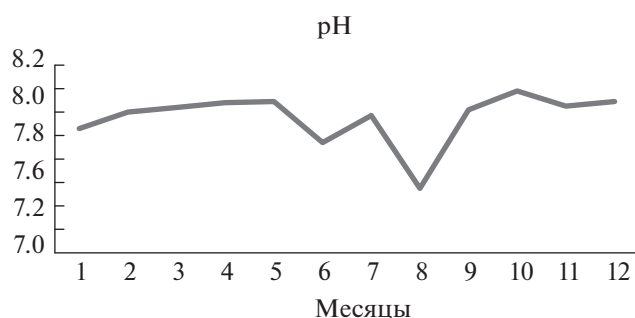
В 2019 г. температура воздуха существенно возросла в период с конца марта по апрель и достигала максимальных величин в июне–июле. Такая же динамика отмечена и для температуры рапы (рис. 2). В осенний период температура снижалась вплоть до отрицательных значений. Между температурой воды и температурой воздуха установлена высокая корреляция ( $r = 0.77$ ).

Минерализация рапы и ее удельный вес также возрастали в летний сезон и достигали наивысших значений в июне и июле, после чего снижались (рис. 3). Однако значимой корреляционной связи между температурой воды и данными показателями не установлено.

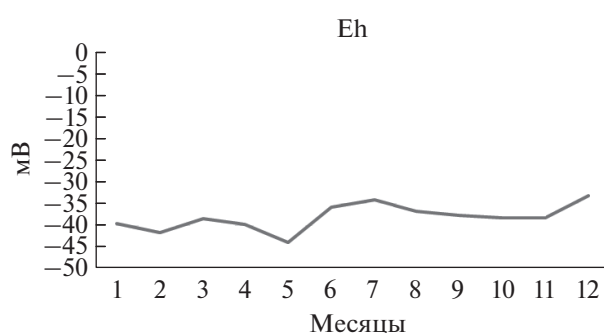
Значения pH рапы слабо варьировали – в пределах 7.6–7.9, но в августе отмечено некоторое снижение этого показателя до 7.2 (рис. 4). Eh менялся в диапазоне от – 41.7 до – 33.1 мВ, при этом минимальное значение было зафиксировано в



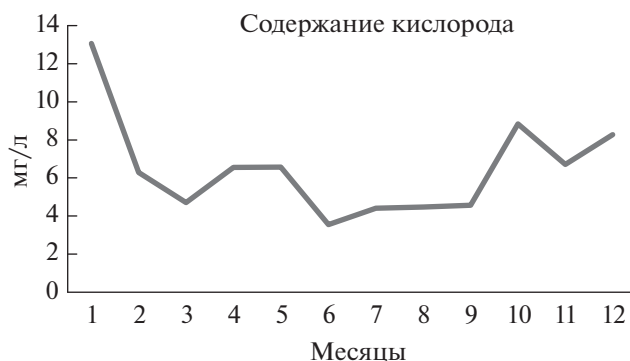
**Рис. 3.** Сезонные колебания минерализации рапы и ее удельного веса в Восточном бассейне оз. Сакского в 2019 г.



**Рис. 4.** Сезонные колебания pH рапы в Восточном бассейне оз. Сакского в 2019 г.



**Рис. 5.** Сезонные колебания Eh рапы в Восточном бассейне оз. Сакского 2019 г.



**Рис. 6.** Сезонные колебания содержания кислорода в рапе Восточного бассейна оз. Сакского в 2019 г.

мае (рис. 5). Содержание кислорода последовательно снижалось, самые низкие показатели были установлены в июне (3.55 мг/л), самые высокие – в январе (13.06 мг/л) (рис. 6). Не выявлено взаимосвязи между температурой рапы, pH и Eh, но обнаружена средняя корреляция с содержанием кислорода ( $r = 0.36$ ). Слабая корреляция отмечена между минерализацией рапы, Eh и содержанием кислорода ( $r = 0.21$  и  $r = 0.18$  соответственно).

Содержание растворенных катионов и анионов в рапе Восточного бассейна оз. Сакского также менялось в зависимости от сезона. Как можно видеть по данным в табл. 1, 2, суммарное содержание катионов натрия и калия колебалось в пределах 41.07–61.27 г/дм<sup>3</sup>, максимальные значения отмечены в июле, минимальные – в октябре. Концентрация магния менялась от 5.94 до 8.52 г/дм<sup>3</sup> от октября до июля. Содержание кальция возрастало к июню до 0.98 г/дм<sup>3</sup>, после чего снижалось до 0.57 г/дм<sup>3</sup> в октябре и вновь увеличилось к концу года, оставаясь в пределах 0.76–0.84 г/дм<sup>3</sup> в ноябре–марте. Таким образом, общая сумма исследуемых катионов возрастала в летний период, достигая максимальных величин в июле, после чего снижалась до минимальных величин в октябре и

вновь несколько увеличивалась в зимне-весенний период. Самая высокая корреляция ( $r = 0.99$ ) установлена между минерализацией и суммарным содержанием ионов калия и натрия. Связь между минерализацией и концентрацией катионов магния также значительна ( $r = 0.95$ ), но с содержанием катионов кальция она в 2 раза слабее ( $r = 0.46$ ). Низкие корреляции отмечены между pH и содержанием исследуемых катионов ( $r = 0.21$ – $0.25$ ), тогда как с Eh связь не установлена.

Сезонная динамика содержания анионов в рапе Восточного бассейна оз. Сакского приведена в табл. 2. Концентрация хлоридов увеличивалась в весенне-летний период, достигая максимальных величин в июле (106.67 г/дм<sup>3</sup>), затем резко снижалась в октябре (73.48 г/дм<sup>3</sup>), далее возрастала в зимне-весенний период до 83.52–98.84 г/дм<sup>3</sup>. Такая же тенденция отмечена для сульфатов, концентрация которых варьировала от 10.84 г/дм<sup>3</sup> в октябре до 19.12 г/дм<sup>3</sup> в июне. Содержание карбонатов менялось в пределах 0.02–0.07 г/дм<sup>3</sup>, гидрокарбонатов – 0.15–0.26 г/дм<sup>3</sup>. Таким образом, максимальное суммарное содержание анионов отмечено в июле (125.92 г/дм<sup>3</sup>), а минимальное – в октябре (84.55 г/дм<sup>3</sup>). Между содержанием сульфатов и минерализацией рапы установлена высокая

**Таблица 1.** Содержание катионов в рапе Восточного бассейна оз. Сакского в 2019 г.

Дата отбора проб	Катионы									Сумма катионов	
	натрий + калий			магний			кальций				
	г/дм <sup>3</sup>	мг-экв	%-экв	г/дм <sup>3</sup>	мг-экв	%-экв	г/дм <sup>3</sup>	мг-экв	%-экв	г/дм <sup>3</sup>	мг-экв
09.01.2019	50.90	2212.92	78.34	6.99	572.00	20.25	0.80	40.00	1.41	58.69	2824.92
05.02.2019	48.05	2089.19	77.10	7.05	580.00	21.42	0.80	40.00	1.48	55.90	2709.19
04.03.2019	47.46	2063.28	77.11	6.97	573.3	21.43	0.78	39.20	1.46	55.21	2675.78
01.04.2019	48.91	2126.54	76.68	7.32	601.72	21.70	0.90	45.08	1.62	57.13	2773.34
13.05.2019	52.86	2298.23	77.39	7.61	626.22	21.09	0.90	45.08	1.52	61.37	2969.53
05.06.2019	58.69	2551.74	77.64	8.34	685.0	20.87	0.98	49.00	1.49	68.01	3286.74
01.07.2019	61.27	2663.77	78.15	8.52	700.70	20.56	0.88	44.10	1.29	70.67	3408.57
05.08.2019	61.93	2626.22	78.30	8.44	694.14	20.48	0.81	40.43	1.19	71.18	3360.79
02.09.2019	52.13	2266.71	78.22	7.26	597.52	20.62	0.67	33.52	1.16	60.06	2897.75
01.10.2019	41.07	1785.63	77.54	5.94	488.98	21.23	0.57	28.30	1.23	47.58	2302.91
06.11.2019	56.88	2472.85	78.48	7.74	636.35	20.19	0.84	41.97	1.33	65.46	3151.17
02.12.2019	53.82	2339.91	78.16	7.49	615.86	20.57	0.76	38.06	1.27	62.07	2993.83

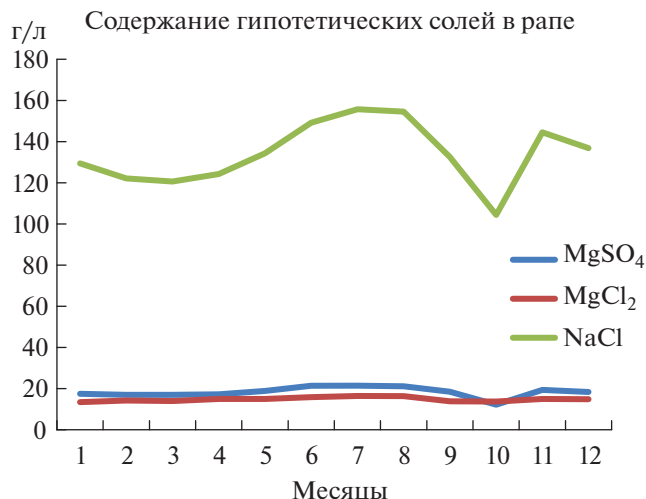
**Таблица 2.** Содержание анионов в рапе Восточного бассейна оз. Сакского в 2019 г.

Дата отбора	Анионы												Сумма анионов	
	хлориды			сульфаты			карбонаты			гидрокарбонаты				
	г/дм <sup>3</sup>	мг-экв	%-экв	г/дм <sup>3</sup>	мг-экв	%-экв	г/дм <sup>3</sup>	мг-экв	%-экв	г/дм <sup>3</sup>	мг-экв	%-экв	г/дм <sup>3</sup>	мг-экв
09.01.2019	88.44	2494.50	88.30	15.64	325.63	11.53	0.07	2.33	0.08	0.15	2.46	0.09	104.30	2824.92
05.02.2019	84.66	2387.88	88.14	15.18	316.05	11.66	0.04	1.33	0.05	0.24	3.93	0.15	100.12	2709.19
04.03.2019	83.52	2355.70	88.04	15.16	315.64	11.80	0.02	0.67	0.02	0.23	3.77	0.14	98.93	2675.78
01.04.2019	86.55	2441.19	88.03	15.72	327.37	11.80	0.05	1.67	0.06	0.19	3.11	0.11	102.51	2773.34
13.05.2019	92.59	2611.55	87.95	16.94	352.70	11.88	0.06	2.0	0.07	0.20	3.28	0.10	109.79	2969.53
05.06.2019	102.22	2883.06	87.72	19.12	398.08	12.11	0.05	1.67	0.05	0.24	3.93	0.12	121.63	3286.74
01.07.2019	106.67	3008.69	88.27	18.97	394.96	11.59	0.02	0.66	0.02	0.26	4.26	0.12	125.92	3408.57
05.08.2019	105.92	2987.53	88.16	18.78	391.00	11.54	0.012	0.40	0.01	0.308	5.05	0.15	125.02	3383.98
02.09.2019	90.63	2556.36	88.22	16.16	336.46	11.61	0.03	1.0	0.03	0.24	3.93	0.14	107.06	2897.75
01.10.2019	73.48	2072.44	89.99	10.84	225.69	9.80	0.06	2.0	0.09	0.17	2.78	0.12	84.55	2302.91
06.11.2019	98.84	2787.80	88.47	17.20	358.11	11.36	0.03	1.0	0.03	0.26	4.26	0.14	116.33	3151.17
02.12.2019	93.99	2651.04	88.55	16.20	337.39	11.27	0.04	1.3	0.04	0.25	4.1	0.14	110.48	2993.83

корреляция ( $r = 0.91$ ), значительная корреляция отмечена между минерализацией и концентрацией анионов хлора ( $r = 0.57$ ), умеренная – с концентрацией гидрокарбонатов ( $r = 0.32$ ), тогда как связь с содержанием карбонатов отсутствует. Умеренная корреляция выявлена между рН и содержанием сульфатов ( $r = 0.33$ ), слабая – с содержанием хлоридов, с содержанием остальных анионов связь не обнаружена.

Сезонные изменения гидрохимических параметров рапы происходят не только под воздействием специфических метеорологических и

гидрогеологических условий, но и вследствие искусственного регулирования водно-солевого баланса, что установлено в Восточном бассейне оз. Сакского. На рис. 7, показывающем сезонные изменения содержания основных гипотетических солей –  $MgSO_4$ ,  $MgCl_2$  и  $NaCl$ , отчетливо прослеживается продолжающийся рост рассчитанных концентраций этих компонентов после начала закачки морской воды в акваторию озера, которая в 2019 г. была начата в июне и закончена в октябре. Увеличение концентрации  $NaCl$  продолжалось в июне, в июле наблюдалась стабилизация минерализации, а с августа произошло

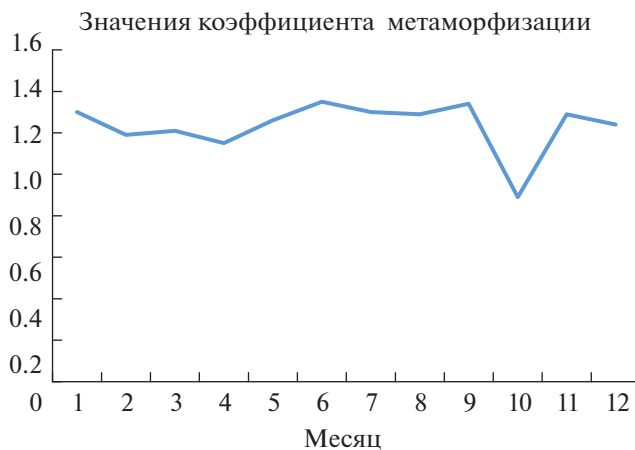


**Рис. 7.** Сезонные изменения содержания гипотетических солей в рапе Восточного бассейна оз. Сакского в 2019 г.

снижение концентрации. В то же время концентрация  $MgSO_4$  и  $MgCl_2$  продолжала увеличиваться до августа, падение этого показателя было отмечено с сентября по октябрь. Однако сезонные изменения коэффициента метаморфизации ( $K_M$ ) не совпадали с установленными трендами содержания гипотетических солей в рапе в период подачи морской воды (рис. 8).

Таким образом, искусственная закачка 1 млн м<sup>3</sup> морской воды с целью компенсации испарения (при среднем расчетном объеме Восточного бассейна 1.27 млн м<sup>3</sup>) оказала заметное влияние на гидрохимический состав рапы, которое проявилось не только в привнесении дополнительного объема солей в акваторию, но и в изменении их соотношения.

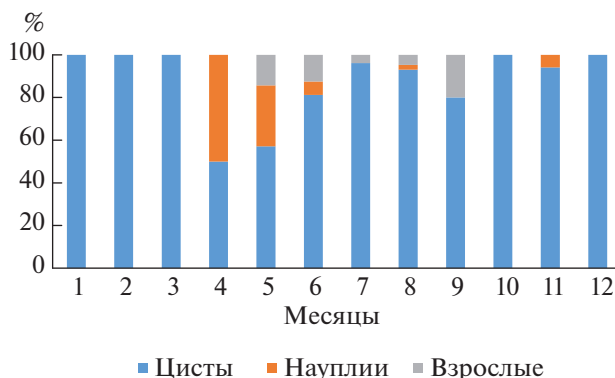
Сезонным изменениям также подвержена популяция артемии, обитающая в водоеме, что выразилось в колебаниях численности рачка и в соотношении его жизненных стадий (табл. 3; рис. 9). В течение года в водоеме присутствовали цисты рачка, причем число их варьировало, а локализация зависела от направления ветра. При этом часть цист концентрировалась по берегам озера. При повышении температуры воздуха и прогревании воды до 15–19°C в водоеме в массовом количестве появлялись личинки (науплии), вылупляющиеся из цист. Однако единичные экземпляры науплиев были отмечены и при более низкой температуре рапы ранней весной. В теплый период с мая по сентябрь выявлены взрослые особи, представленные в основном половозрелыми самками. В октябре–ноябре в рапе наряду с цистами обнаружено большое количество отмерших взрослых рачков, но встречались единичные личинки. В декабре при понижении температуры



**Рис. 8.** Сезонные изменения коэффициента метаморфизации  $K_M$  в рапе Восточного бассейна оз. Сакского в 2019 г.

воздуха и воды в рапе присутствовали цисты рачка, которые также в значительных количествах концентрировались по берегам.

На рис. 9 представлена динамика соотношения количеств цист, науплиев и взрослых особей артемии в разные сезоны в воде Восточного бассейна оз. Сакского. Как можно видеть, во все сезоны доминировали цисты, кроме апреля, когда число науплиев и цист было представлено в равных количествах. Взрослые раки, которые были обнаружены в период с мая по сентябрь, составляли меньшую часть популяции артемии, число науплиев занимало промежуточное положение. Обращает на себя внимание тот факт, что в июле и сентябре в рапе отсутствовали взрослые артемии или были найдены мертвые особи и их фрагменты, что может свидетельствовать о неблагоприятных условиях для их существования в водоеме в данный период.



**Рис. 9.** Сезонные изменения соотношения различных жизненных стадий артемии в Восточном бассейне оз. Сакского в 2019 г.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экологическое состояние озер зависит от многих факторов, включая межгодовые климатические флуктуации, сезонные изменения абиотических и биотических условий в озере и на прилегающей к нему территории, наличие грунтовых вод, расположение по отношению к уровню моря и степень близости к нему, атмосферные осадки, розы ветров, солнечное излучение и ионный состав воды [6, 22, 35, 38], а в настоящее время – также и антропогенная активность. Как показали исследования в последние годы, изменение климата с повышением температуры и сокращением количества атмосферных осадков существенно меняет гидрологический режим внутренних водоемов, что приводит к снижению в них объема воды. Кроме того, этому же способствует хозяйственная деятельность человека, которая также значительно модифицирует сформированный в течение длительного времени гидрологический режим озер. Совокупность этих двух факторов приводит к необратимым последствиям для водоема, подчас критическим, заканчивающимся их деградацией или исчезновением [22].

Климатические и сезонные изменения на территории, связанные прежде всего с колебаниями температуры, оказывают наибольшее влияние на озерные экосистемы, так как регулируют водный баланс, определяемый соотношением процессов испарения и поступления воды с осадками и грунтовыми водами. В связи с этим некоторые исследователи считают, что озера и их водный баланс – адекватные индикаторы изменения климата [33].

Результаты проведенных исследований позволили установить характерные сезонные колебания физико-химических параметров рапы Восточного бассейна оз. Сакского и их зависимость от гидрометеорологических факторов, в частности от температуры воздуха и количества атмосферных осадков. В летний период были отмечены самые высокие значения температуры воздуха и температуры воды, в результате интенсивного испарения повысились минерализация и удельный вес рапы, а также входящих в ее состав основных катионов и анионов, максимальная концентрация которых была установлена в июле и в августе. Вместе с тем между показателями – минерализацией рапы, ее удельным весом, рН и Eh – не обнаружены значимые корреляции с изменением температуры, тогда как с показателями содержания кислорода обнаружена умеренная связь ( $r = 0.36$ ). Следует отметить, что гидрохимические показатели и содержание исследуемых катионов и анионов в рапе Восточного бассейна оз. Сакского соизмеримы с таковыми в воде других соленых озер Причерноморья [23].

**Таблица 3.** Сезонная динамика изменения числа жизненных стадий артемии, экз/л (числитель – среднее из трех определений, знаменатель – пределы) в воде Восточного бассейна оз. Сакского в 2019 г.

Месяцы	Цисты	Науплии	Взрослые раки
1	$\frac{2}{2-3}$	0	0
2	$\frac{60}{7-112}$	0	0
3	$\frac{16}{7-24}$	0	0
4	$\frac{2}{1-7}$	$\frac{2}{1-5}$	0
5	4	2	1
6	$\frac{13}{12-13}$	$\frac{1}{0.5-0.8}$	$\frac{2}{1-2}$
7	$\frac{25}{19-31}$	0	1
8	$\frac{40}{10-71}$	1	2
9	$\frac{2}{0-4}$	0	1
10	$\frac{14}{8-19}$	0	0
11	$\frac{8}{6-9}$	1	0
12	$\frac{5}{3-6}$	0	0

Учитывая тот факт, что гиперсоленые водоемы обладают важнейшими ресурсами и приобретают все большую популярность для целей рекреации и туризма, исследования сезонной динамики их водно-солевого баланса имеют значение для их сохранения и рационального использования [5, 13, 14, 17]. В связи с этим совершенно очевидно, что для поддержания надлежащего состояния лечебных илов и жизнедеятельности биоты в летний сезон, характеризующийся экстремальными температурой и испарением, необходимо поддерживать определенный уровень минерализации, что достигается искусственным регулированием водно-солевого баланса водоема посредством ГТС.

Как показано выше, в наиболее широком диапазоне происходят изменения концентрации хлоридов, что связано не только с ее сезонными естественными колебаниями, но и с искусственным регулированием водно-солевого режима

озера. Вследствие интенсивного естественного наполнения водоема пресными метеорными и грунтовыми водами происходит значительное снижение концентрации хлоридов в весенний период, а с начала июня рапа начинает интенсивно испаряться. В этом случае для искусственного поддержания необходимого технологического объема бассейна осуществляется закачка морской воды. Интенсивное испарение с одновременным привнесением дополнительных солей обеспечивает высокие концентрации хлоридов в летне-осенний период. При этом исследователи обращают особое внимание на соотношение катионов кальция и магния, уменьшение содержания которых может свидетельствовать об антропогенном воздействии на водоем [23]. Однако сезонные колебания этого показателя в рапе Восточного бассейна были крайне незначительны (0.10–0.12), что подтверждает эффективность мер по регуляции водно-солевого режима бассейна с помощью соответствующих ГТС. Описанная выше тенденция сезонного изменения концентрации хлоридов характерна и для других определяемых ионов, прежде всего для натрия и магния.

Вероятно, искусственное регулирование минерализации рапы в Восточном бассейне оз. Сакского путем подачи морской воды существенно меняет естественные природные процессы, при повышении температуры характеризующиеся усиленным испарением и повышением солености вплоть до осаждения соли на дне и на берегах водоема [7, 21, 36]. Отмечена высокая корреляция между минерализацией и содержанием катионов в рапе – суммарной концентрацией калия и натрия  $r = 0.99$ , концентрацией магния  $r = 0.95$ ; более низкая – с концентрацией ионов кальция  $r = 0.46$ .

Увеличение содержания минералов в рапе в жаркий период может негативно сказаться на биоте, особенно в случае наличия в воде тяжелых металлов, попадающих туда в том числе в результате техногенной активности [16, 17, 21, 29]. Следует отметить, что для экосистем соленых озер важны не только концентрация различных ионов, но и их соотношение. Изменение этого показателя может существенным образом повлиять на жизнедеятельность биоты, включая популяцию артемии, фитопланктон и микробные сообщества, играющие важную роль в процессах образования лечебных грязей [14, 20, 31]. Настоящие исследования показали, что цисты артемии присутствовали в рапе Восточного бассейна в течение всего года. Число их существенно варьировало в зависимости от сгонно-нагонных явлений, а также от оседания их на дно и концентрирования по берегам водоема, что отмечено и другими исследователями [4, 25, 26]. Науплии в рапе в массовом количестве появлялись в апреле, когда температура воды поднималась выше  $+10^{\circ}\text{C}$ , хотя

единичные экземпляры встречались и в феврале–марте. Эти личинки вылуплялись из цист, которые были продуцированы самками осенью перед массовым отмиранием, что обеспечило сохранение их в рапе и дальнейшее воспроизводство популяции рачка при благоприятных условиях (температуре и солености) [37]. В мае–июне в популяции появлялись взрослые половозрелые самки и происходил процесс живорождения. В этот период температура повышалась и условия для жизнедеятельности рачка ухудшались, что обусловлено снижением концентрации кислорода, истощением кормовой базы (фитопланктона), а затем и возрастанием солености. В июле–сентябре число науплиев и взрослых особей резко снижалось, так как температурный режим воды и высокая соленость неблагоприятны для данных жизненных стадий рачка, и в октябре доминировали цисты. В ноябре при выпадении осадков и распреснении бассейна опять появлялись науплии, но снижение температуры в декабре не позволило им развиваться до взрослых особей. В это время в водоеме было отмечено много органических остатков, фрагментов и отмерших взрослых раков, которые оседали на дно и способствовали образованию лечебных илов. Таким образом, жизнедеятельность артемии в водоеме проявляла четкую зависимость от условий, формирующихся под действием климатических и сезонных факторов, в том числе от температуры рапы, концентрации солей и содержания кислорода в воде, а также от кормовой базы. Следует отметить, что в настоящее время с учетом важности артемии как стартового корма для объектов аквакультуры вопросам оптимизации выращивания и добычи рачка в естественных и искусственных условиях уделяется много внимания. Исследователи изучают влияние различных факторов на развитие артемии, в том числе непосредственно зависящих от климата [28], соотношения и содержания компонентов рапы [32], состава пищи [20, 39], а также роль рачка в процессах формирования лечебных илов, что очень важно для сохранения и рационального использования ресурсов соленых озер [26]. Таким образом, полученные данные позволяют понять особенности сезонной динамики экогидрологических условий Восточного бассейна оз. Сакского – важнейшего источника гидроминеральных и лечебных ресурсов Крыма.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований показали четкую зависимость динамики экогидрологических условий Восточного бассейна оз. Сакского от природных (климатических) факторов и от искусственной регуляции водоема, которая позволила поддержать в нем оптимальный уровень минерализации и условия для жизнедеятельности биоты



в летний период. Это имело особое значение в наиболее критический сезон – июль–август, характеризующийся интенсивным испарением и высокой температурой воды, превышающей +30°C. В летние месяцы был установлен самый высокий уровень минерализации рапы, содержания в ней катионов и анионов. При этом искусственная закачка 1 млн м<sup>3</sup> морской воды с целью компенсации испарения (при среднем расчетном объеме Восточного бассейна 1.27 млн м<sup>3</sup>) оказала положительное влияние на гидрохимический состав рапы – привнесение дополнительного объема солей в акваторию без существенного изменения их соотношения. Рост концентрации NaCl отмечен в июне, в июле происходила стабилизация минерализации, а в августе установлено ее снижение. Иная закономерность обнаружена для MgSO<sub>4</sub> и MgCl<sub>2</sub>, их содержание продолжало увеличиваться до августа, затем происходило падение этого показателя с сентября по октябрь. Вместе с тем сезонные изменения коэффициента метаморфизации K<sub>м</sub> не совпадали с установленными трендами содержания гипотетических солей в рапе в период подачи морской воды. Жизнедеятельность артемии в водоеме проявляла четкую зависимость от условий, формировавшихся под действием климатических, сезонных и антропогенных факторов, – прежде всего от температуры, концентрации солей и содержания кислорода, а также от кормовой базы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.В., Малахов А. М. Генетическая классификация лечебных грязей (пелоидов). М.: Гидрометиздат, 1963. С. 38–61.
2. Котова И.К., Каюкова Е.П., Мордохай-Болтовская Л.В., Платонова Н.В., Котов С.Р. Закономерности формирования состава иловых грязей Мёртвого моря и соляных озер Крыма // Вестн. СПбГУ. 2015. Сер. 7. № 2. С. 85–100.
3. Критерии оценки качества лечебных грязей при их разведке, использовании и охране. Методические указания № 10–11/40 от 11.03.1987 г. М.: Минздрав СССР, 1987.
4. Литвиненко Л.И., Куцанов К.В., Разова Л.Ф., Гадиадуллина А.Ш., Герасимов А.Г., Бражников Е.В. Внутри- и межпопуляционная изменчивость цист и взрослых стадий артемии (Branchiopoda: Anostraca) в сибирских популяциях (морфометрия) // Морской биол. журн. 2021. 6 (2). С. 33–51.
5. Любчик В.Н., Ежов В.В. Лечебные грязи Крыма. Евпатория, 2018. 102 с.
6. Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А. Формирование химического состава вод озер в условиях изменения окружающей среды. М.: Наука, 2010. 268 с.
7. Руднева И.И., Шайда В.Г. Сезонная динамика гиперсоленого озера Ойбург (Крым) как модель для изучения последствий изменения климата // Вод. ресурсы. 2020. Т. 47. № 4. С. 426–437.
8. СанПиН 2.1.5.980-00 Гигиенические требования к охране поверхностных вод.
9. СанПиН 2.1.5.2582-10 Санитарно-эпидемиологические требования к охране прибрежных вод морей от загрязнения в местах водопользования населения.
10. Хохлов В.А., Гулов О.А. Научная летопись Сакского озера. Симферополь: Доля, 2001. С. 27–36.
11. Чабан В.В. Влияние техногенных изменений геологической среды на экологическое состояние Сакского соленого озера // Вестн. Днепропетровского нац. ун-та. Сер. Геология. География. 2013. Т. 2. Вып. 16. С. 77–84.
12. Чабан В.В. Применение биоиндикатора *Artemia salina* при экологическом изучении соленых озер Крымского полуострова (на примере озер Евпаторийской группы) // Строительство и техногенная безопасность. 2012. № 43. С. 102–105.
13. Шибанов С.Э. Гигиеническая оценка грязевых месторождений Крыма и необходимость системы мониторинга их качества // Вестн. физиотерапии и курортологии. 2018. № 21 (1). С. 131.
14. Akhmedenov K.M. Tourist and recreational potential of the salt lakes of Western Kazakhstan // Geoj. Tourism Geosites. 2020. V. 30. № 2. P. 782–787.
15. Aljohny B.O. Halophilic bacterium – a review of new studies (Review) // Biosci. Biotechnol. Res. Asia. 2015. V. 12. Is. 3. P. 2061–2069.
16. Banerji S., Mitra D. Grey water footprint of domestic households in Salt Lake City, India: an overview // Water Utility J. 2017. V. 15. P. 15–27.
17. Chapra S.C., Dove A., Warren G.T.J. Long-Term trends of Great Lakes Major ion chemistry. // J. Great Lakes Res. 2012. V. 38. P. 550–560.
18. Di Meglio, Santos L., Gomariz F, Almansa M., Lopez C.C., Anton J., Nercessian D. Seasonal dynamics of extremely halophilic microbial communities in three Argentinian salterns (Article) // FEMS Microbiol. Ecol. 2016. V. 92. Is. 12. Article number fiw184.
19. Edbeib M.F., Wahab R.A., Huyop F. Halophiles: biology, adaptation, and their role in decontamination of hypersaline environments (Review) // World J. Microbiol. Biotechnol. 2016. V. 32. Iss. 8. Article number 135.
20. Gajardo G., Beardmore J.A. The brine shrimp *Artemia*: adapted to critical life conditions // Frontiers Physiol. 2012. V. 3. Article 185.
21. Golan R., Gavrieli I., Ganor J., Lazarc B. Controls on the pH of hyper-saline lakes – A lesson from the Dead Sea // Earth Planetary Sci. Lett. 2016. V. 434. P. 289–297.
22. Irwandi H., Rosid M.S., Mart T. The effects of ENSO, climate change and human activities on the water level of Lake Toba, Indonesia: a critical literature review // Geosci. Lett. 2021. V. 8. № 21. P. 1–13.
23. Lazar V., Iordache F., Curutiu C., Ditu L.M., Holban A., Gheorghe I., Marinescu F., Ilie M., Ivanov A., Dobre D., Chifiriuc M. Physico-chemical and microbiological assessment of organic pollution in Play Salty lakes from protected regions // J. Environ. Protect. 2017. V. 8. P. 1474–1489.
24. Li S.-Y., Xin Y.-J., Bao Ch. X., Hou J., Cui H.-L. *Haloprofundus salilacus* sp. nov., *Haloprofundus halobius* sp.

- nov.* and *Haloprofundus salinisoli* sp. nov.: three extremely halophilic archaea isolated from salt lake and saline soil // *Extremophiles*. 2022. V. 26. Article number 6.
25. Litvinenko L., Litvinenko A., Boyko E., Korentovich M., Zenkovich P. Experimental studies to increase the natural resources of brine shrimp *Artemia* in hyperhaline reservoirs // *IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci.* 2021. P. 937. Article 022073.
  26. Litvinenko L.I., Litvinenko A.I., Boiko E.G., Kutsanov K.V., Korentovich M.A. The impact of *Artemia* cysts harvest in the formation of therapeutic mud in salt lakes // *J. Sib-FU. Biol.* 2020. V. 13. № 4.
  27. Lomakin P.D. Features of the Oceanological Values Fields in the Sivash Bay (The Sea of Azov) // *Physical Oceanogr.* 2021. V. 28. № 6. P. 647–659.
  28. Monteiro R. Evidence of the effects of dissolved carbon dioxide on hatching rates of *Artemia salina* cysts // *Wheaton J. Develop. Biol. Res.* 2021. Iss. 6. P. 1–6.
  29. Ogah S.Ph.I. Heavy metals in Keana salt lake and some sources of drinking water within the Keana salt lake community, Nasarawa State, Nigeria // *Sci. J. Anal. Chemv.* 2020. V. 8. № 2. P. 56–59.
  30. Oliveira U.O., Araujo A.S.R., Belloo-Klein A., Da Silva R.S.M., Kucharski L.C. Effects of environmental anoxia and different periods of reoxygenation on oxidative balance in gills of the estuarine crab *Chasmagnathus granulata* // *Comp. Biochem. Physiol.* 2005. Pt B. V. 140. P. 51–57.
  31. Pepenel I., Cracium N., Jujea V., Florea A., Pop C.E., Stoian G. Biochemical parameters of salt lakes sapropelic sludge from Buzau Country protected area, with different degrees of microbiological attrition // *Sci. Annals Danube Delta Inst.* 2020. V. 25. P. 101–111.
  32. Pillard D.A., Tapp K.L. Influence of feeding and organism age on the acute toxicity of sodium bromide to *Artemia salina* // *Ecotoxicol.* 2021. V. 30. P. 914–918.
  33. Reyes-Garcia V., Fernandez-Lamasares A., Guese M., Graces A., Mallo M., Villa-Gomes M., Vlaseca M. Local indicators of climate change the potential contribution of local knowledge to climate research // *Clim. Change*. 2016. V. 7. № 1. P. 109–124.
  34. Sagasti A., Schaffner L.C., Duffy J.E. Effects of periodic hypoxia on mortality, feeding and predation in an estuarine epifaunal community // *J. Experiment. Mar. Biol. Ecol.* 2001. V. 258. P. 257–283.
  35. Siniscalchia A.G., Koppriob G., Raniolob L.A., Gomezb E.A., Diaza M.S., Lara R.J. Mathematical modelling for ecohydrological management of an endangered endorheic salt lake in the semiarid Pampean region, Argentina // *J. Hydrol.* 2018. V. 563. P. 778–789.
  36. Sirota I., Arnon A., Lensky N.G. Seasonal variations of halite saturation in the Dead Sea // *Water Resour. Res.* 2016. V. 52. Iss. 9. P. 7151–7162.
  37. Sorgeloos P., Roubach R. Past, present and future scenarios for SDG-aligned brine shrimp *Artemia* aquaculture // *FAO Aquaculture News*. 2021. № 63. P. 55–56.
  38. Turner J.V., Rosenb M.R., Coshellc L., Woodbury R.J. Cyclic heliothermal behaviour of the shallow, hypersaline Lake Hayward, Western Australia // *J. Hydrol.* 2018. V. 560. P. 495–511.
  39. Vahdat S., Oroujlou M. Use of agriculture by-products (brans and meal) as food for *Artemia franciscana* (Kellogg, 1906) and effects on performance and biochemical compositions // *J. Survey in Fish. Sci.* 2021. V. 7. № 3. P. 23–40.
  40. Xinyi F., Yihong I Y., Lin M., Xiaoying I., Zhehui I H., Jijie L., Liu L., Fushun W. Coupling effects of hydrological characteristics and nutrient load in sediments on the trophic state of reservoirs // *Acta Geochim.* 2021. V. 40. P. 640–649.