

ВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

УДК 577.115.3+577.359

ОСОБЕННОСТИ МЕЖГОДОВОЙ И СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СОЛЕННЫХ ОЗЕР В УСЛОВИЯХ АРИДНОГО КЛИМАТА КРЫМА

© 2022 г. И.И. Руднева*, В.Г. Шайда**, А.В. Щерба***

*Морской гидрофизический институт РАН
Россия 229011, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2. E-mail: svg-41@mail.ru2

**ООО «Экосервис-А»
Россия, 107140, г. Москва, ул. Верхняя Красносельская, д. 17А

*** ООО «Севстар»
Россия, 299011, г. Севастополь, ул. Хрусталева, д. 74а

Поступила в редакцию 14.12.2021. После доработки 01.03.2021. Принята к публикации 01.04.2022.

На территории Крымского полуострова расположены уникальные озера различного генезиса, обладающие высоким рекреационным и бальнеологическим потенциалом. Они испытывают существенное антропогенное воздействие, которое наряду с засушливым климатом приводит к негативным последствиям для экосистемы, вплоть до утраты биологических и гидроминеральных ресурсов. При этом близлежащие водоемы могут существенно различаться в результате хозяйственной деятельности человека. Озеро Мойнаки на западной окраине г. Евпатория разделено песчаной пересыпью на два водоема Мойнаки 1 (большой) и Мойнаки 2 (меньший). Целью настоящей работы явилось исследование некоторых физико-химических параметров воды (температуры, рН, содержания кислорода, солености, окислительно-восстановительного потенциала Eh) и популяции артемии (*Artemia salina* (L., 1758)) в этих водоемах в период 2018-2020 годов. Сезонная динамика данных параметров характеризовалась увеличением солености и Eh в летний период вследствие повышения температуры воздуха и воды и ее интенсивного испарения. Одновременно происходило снижение содержания кислорода и рН. Выявленные особенности данных процессов были более выражены в Мойнаки 2 по сравнению с Мойнаки 1. Цисты артемии были обнаружены в обоих водоемах, тогда как науплии и взрослые особи только в Мойнаки 2 в 2020 году после пересыхания и последующего восстановления гидрологического режима водоема.

Ключевые слова: гиперсоленые озера, Крым, содержание кислорода, соленость, рН, Eh.

DOI: 10.24412/1993-3916-2022-3-117-125

EDN: TVGBJY

На территории Крымского полуострова находятся уникальные озера различного генезиса, которые обладают высоким рекреационным и бальнеологическим потенциалом. Многие из них располагаются в зоне засушливого климата и испытывают при этом существенное антропогенное воздействие. Совокупное влияние этих факторов приводит к негативным последствиям для экосистемы, вплоть до утраты биологических и гидроминеральных ресурсов (Гулов, 2007). Солёные озера – источники минеральных вод и лечебных грязей, которые являются важнейшими составляющими рекреации и туризма, а также наряду с климатом являются основными компонентами туристической отрасли Крыма. Экологический и оздоровительный туризм становится все более популярным, и уникальные возможности гиперсоленых водоемов полуострова могут способствовать его успешному продвижению (Akhmedenov, 2020).

Поскольку экологическое состояние внутренних водоемов во многом определяется совокупным влиянием на прилегающие территории природных и антропогенных факторов, исследование основных характеристик водных объектов представляет несомненный интерес с точки зрения анализа эффектов взаимодействия суши и водоема и позволяет составить прогноз дальнейшей трансформации экосистемы вследствие этих взаимодействий, в т.ч. в условиях изменения климата (Моисеенко, Гашкина, 2010; Литвиненко и др., 2018; Markova et al., 2021). В ряде случаев

антропогенному воздействию в результате слива в водоем паводковых вод и бытовых стоков (рис. 2, Мойнаки 2).

Антропогенное воздействие на озеро в последние годы возрастает в результате стремительной урбанизации, расширения строительства здравниц и жилых кварталов на побережье и в зоне лечебных озёр, повышения уровня грунтовых вод, вызванное стоками с сельскохозяйственных земель. Все эти факторы нарушают естественный режим экосистем закрытых водоёмов. Лиманы стали быстро опресняться и загрязняться. Повысился уровень грунтовых вод, нарушающий естественные процессы и экосистему озера, минерализация рапы уменьшается, что грозит утратой лечебных свойств водного объекта, а Евпатория может потерять статус бальнеологического курорта, т.к. для 70 % лечащихся здесь отдыхающих основой лечения являются целебные свойства озера Мойнаки (Горячкин, 2020).



Рис. 2. Озеро Мойнаки (Евпатория, Крым).

Учитывая все вышесказанное, а также планируемую в ближайшее время интенсивную застройку берегов озера, целью настоящей работы мы сделали исследование некоторых физико-химических параметров воды и состояния популяции артемии (*Artemia salina* (L, 1758)) в двух водоемах озера Мойнаки в период 2018-2020 годов.

Методы исследования

Пробы рапы отбирали ежемесячно в период 2018-2020 годов в контрольных точках в двух тестируемых акваториях озера Мойнаки (рис. 2). Температуру воды измеряли непосредственно в водоемах с помощью термометра фирмы HANNA.

Показатели pH, окислительно-восстановительного потенциала (Eh) и содержания кислорода измеряли в лабораторных условиях при помощи анализатора Expert-001 («Econix-Expert Моеха CoLtd.», Россия) в соответствии с методами, изложенными нами ранее (Rudneva et al., 2021).

Анализ жизненных стадий популяций артемии из двух водоемов проводили путем отбора проб рапы с помощью специального устройства объемом рабочей части 5 л. Пробы концентрировали с использованием мелкоячеистого фильтра и подсчитывали различные жизненные стадии рачка под бинокулярным микроскопом МБС-10, показатели выражали в экземпляр/л. Вылупление науплиев из цист артемии оценивали в соответствии с методом, изложенными нами ранее (Rudneva et al., 2021).

Результаты и обсуждение

Максимальная температура воздуха в районе расположения исследуемых водоемов была отмечена в июле-августе: в 2018 году и в 2020 году она достигала +34°C, а в 2019 г. – +31°C (рис. 3). Аналогичная зависимость была характерна и для температуры воды в обоих водоемах. В летние

месяцы температура рапы в большинстве случаев была выше в Мойнаки 2 по сравнению с Мойнаки 1. В 2019 году температура воды во втором водоеме (Мойнаки 2) в летний период превышала показатели 2018 года, а в 2020 году он пересох и оставался сухим с июля по сентябрь и только в октябре наполнился за счет атмосферных осадков.

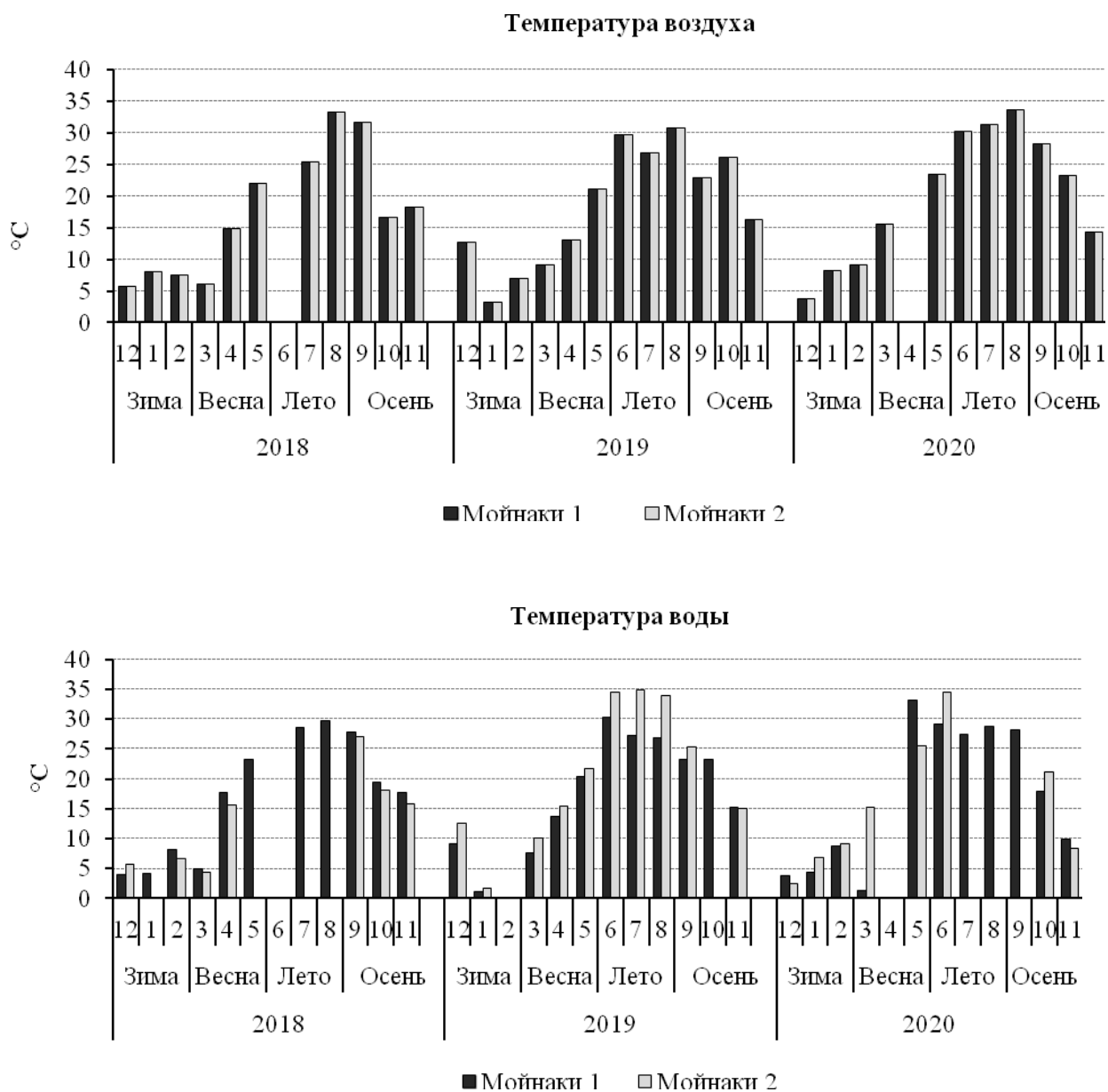


Рис. 3. Изменение температуры воздуха и воды в районе озера Мойнаки.

Изменения солености в двух водоемах различалось как по значениям, так и по линии тренда (рис. 4). Если в большом водоеме (Мойнаки 1) она колебалась в пределах 40-60‰ в течение года, то в Мойнаки 2 величины были существенно больше, так же как и размах их колебаний – 235-347‰. Более того, водоем пересох и оставался таковым в период июль-сентябрь 2020 года. В 2018 году соленость в Мойнаки 1 изменялась в пределах 41-68‰, снижалась весной и повышалась в летне-осенний период, оставаясь высокой зимой. В 2019 г. соленость варьировала меньше (53.9-65.5‰), но в 2020 году размах колебаний этого показателя возрос от 46.1 до 68.3‰. Причем самое низкое значение было отмечено в январе, но увеличилось в феврале-марте (более 50‰), а в остальные месяцы превышало 60‰.

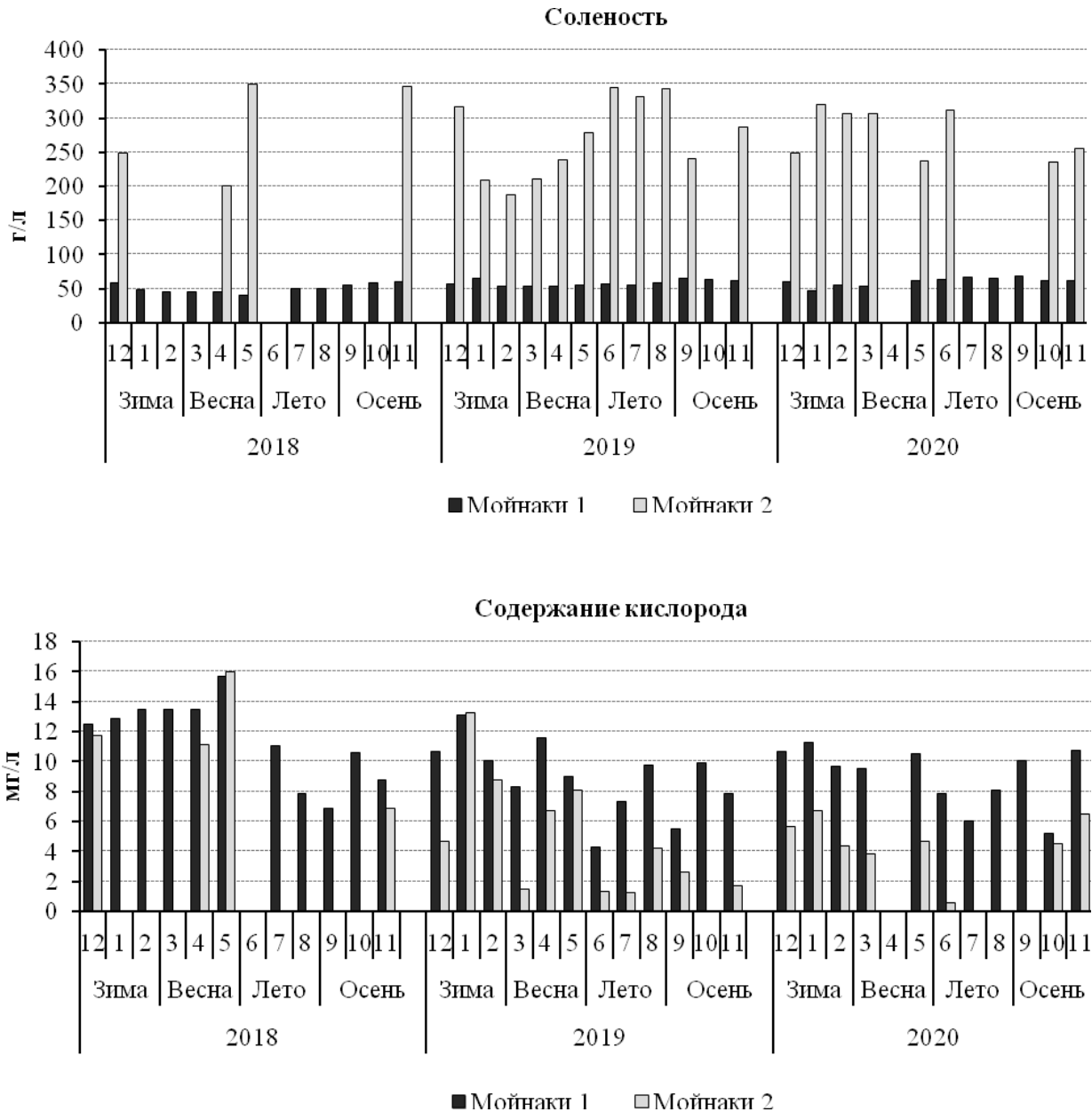


Рис. 4. Изменение солености воды и содержания кислорода в ней в двух водоемах озера Мойнаки.

В водоеме Мойнаки 2 (рис. 4) выявлена иная зависимость изменения солености. В 2018 году значения показателя снизилось до 200‰ весной, но в летне-осенний период возросли до 35‰ и оставались таковыми вплоть до ноября. В 2019 году отмечена сходная динамика солености в водоеме, которая также достигала максимальных величин в июле-августе, но падала осенью и зимой. В 2020 году соленость закономерно возрастала в летний период, после чего последовало пересыхание водоема и осадение соли по его берегам.

Содержание кислорода в воде Мойнаки 1 (рис. 4) варьировало в достаточно широких пределах: 8.8-15.7 мг/л в 2018 году, 4.33-13.14 мг/л в 2019 году, 5.23-11.32 мг/л в 2020 году. Этот показатель увеличивался зимой, оставался таковым в первые весенние месяцы, но летом и осенью снижался. Уровень содержания кислорода в воде Мойнаки 2 также варьировал в пределах 6.87-15.98 мг/л в 2018 году, 1.25-13.26 мг/л в 2019 году, 0.6-6.52 мг/л в 2020 году. Содержание кислорода в воде этого водоема в большинстве случаев во все исследуемые периоды было ниже, чем в воде Мойнаки 1, что особенно было выражено в 2020 году. В летне-осенний период, а также в марте 2019 года уровень содержания кислорода достигал критических значений.

Годовые и сезонные изменения величин рН были менее выражены в воде исследуемых водоемов (рис. 5). рН воды Мойнаки 1 варьировало в пределах 7.2-7.6 в 2018 году, 7.1-7.6 в 2019 и в 2020 гг. В водоеме Мойнаки 2 значения рН изменялись в большей степени от 7.2 до 7.7 в 2018 году, в пределах 6.8-7.8 в 2019 году и 6.9-7.8 в 2020 году. Если в зимние месяцы величины рН воды в озере Мойнаки 1 были одинаковы или снижены по сравнению с соответствующими показателями воды озера Мойнаки 2, то в летние месяцы наблюдалась противоположная тенденция, особенно четко проявившаяся в 2020 году.

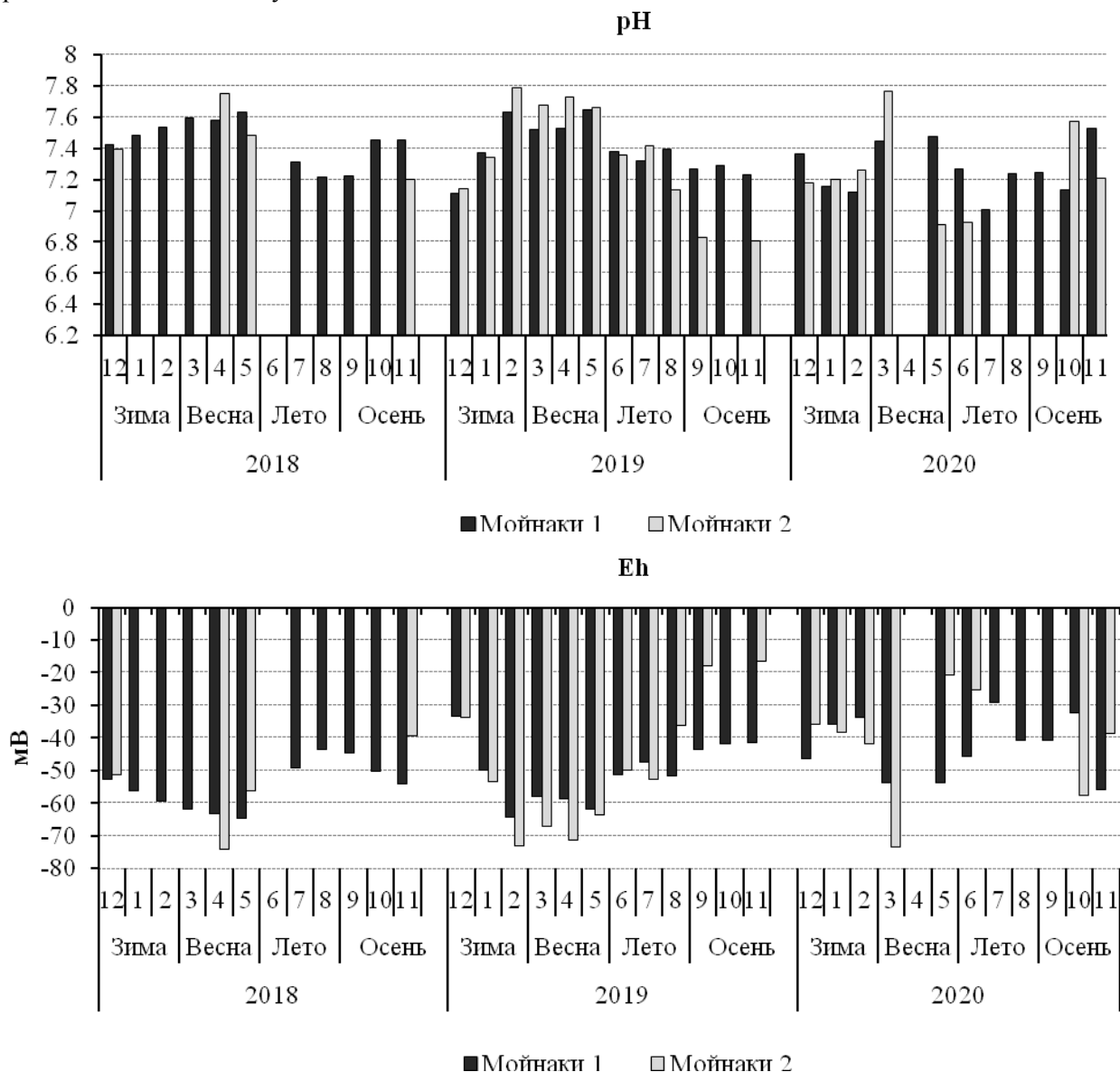


Рис. 5. Изменение рН и Eh в воде двух водоемов озера Мойнаки.

Определенные закономерности были установлены при изучении межгодовой и сезонной динамики окислительно-восстановительного потенциала воды Eh (рис. 5). В 2018 году в воде Мойнаки 1 показатели Eh варьировали от -43.4 в августе-сентябре до -64.4 мВ в весенние месяцы, в 2019 году размах колебаний заключался в пределах от -33.7 мВ в декабре до -64.2 мВ в феврале. В остальные месяцы флуктуации были значительно меньше – в пределах от -47.5 до -61.9 мВ. Можно отметить тенденцию увеличения Eh в летне-осенний период и снижение его в зимне-весенний. В 2019 году Eh изменялся от -29.2 мВ в июле до -55.8 мВ в ноябре. Летом окислительно-восстановительный потенциал был выше, чем зимой.

В 2018 году в водоеме Мойнаки 2 значения окислительно-восстановительного потенциала

колебались в пределах от -39.5 до -74.3 мВ, такая же тенденция отмечена в 2019 году (от -16.6 до -72.9 мВ), а в 2020 году размах колебаний величин Eh заключался в пределах от -25.4 до -73.4 мВ. Следует отметить, что в 2019 году наиболее высокие показатели Eh были установлены осенью, а наиболее низкие – в феврале, в 2020 году минимальные значения Eh были отмечены в марте, а максимальные – в мае.

Анализ состояния биоты в двух исследуемых частях озера Мойнаки показал, что в 2018 году в водоеме Мойнаки 1 в зимне-весенний период присутствовали цисты артемии в количестве 2-4 экз./л и в большом количестве бокоплавыв *Gammarus aequicauda* (Martynov, 1931), тогда как в Мойнаки 2 были выявлены только цисты артемии (*Artemia salina* (L, 1758)). В 2019 году цисты артемии также обнаруживали в обоих водоемах, а в Мойнаки 1 в массовом количестве присутствовали бокоплавыв (*Gammarus aequicauda* (Martynov, 1931)). В 2020 году ситуация в Мойнаки 1 оставалась такой же, и в период май–ноябрь в водоеме в основном обитали гаммарусы (*Gammarus aequicauda* (Martynov, 1931)), тогда как в Мойнаки 2, которое оставалось в пересохшем состоянии с июня по октябрь, после заполнения водоема в октябре в озере появились науплии артемии (в среднем 1 циста/л и 3 науплия/л), в ноябре число их увеличилось до 2 цист и 21 науплия в 1 л, и были найдены взрослые половозрелые самки (в среднем 1 особь в 1 л), в декабре при понижении температуры число цист сократилось до 1-3 в 1 л, науплии и взрослые раки не встречались. На берегу озера также были найдены цисты артемии, процент выклева науплиев из которых составил $16.1 \pm 1.1\%$.

Таким образом, результаты исследований позволили выявить определенные закономерности изменения гидрохимических показателей воды и популяции артемии в двух исследуемых водоемах и установить их особенности, обусловленные специфическими условиями межгодовой и сезонной динамики на фоне изменения климата. Район расположения озера находится в зоне засушливого климата и интенсивной антропогенной деятельности, которая выражается в активной застройке близлежащих территорий и высокой рекреационной нагрузке. За последние 100 лет население города Евпатории увеличилось более чем в 7 раз и в настоящее время составляет 120 тыс. человек, а количество отдыхающих в отдельные годы приближалось к 1 млн. человек в год. В результате нерационального использования рекреационных ресурсов и сильного антропогенного прессинга озеро Мойнаки утратило свое лечебное значение (Горячкин, 2020).

В настоящее время предпринимаются определенные меры для возрождения экосистемы озера и возвращения ему рекреационного значения. Это требует тщательного мониторинга его ресурсов и понимания механизмов, лежащих в основе функционирования водных экосистем, расположенных в районах с экстремальными условиями, в том числе испытывающих значительную антропогенную нагрузку (Горячкин, 2020). Необходимо комплексное изучение факторов, определяющих динамику гидроминеральных параметров водоемов в течение определенного времени и, прежде всего, понимание годового цикла изменения важнейших показателей. Эти параметры характеризуют как собственное состояние водного объекта и его ресурсов, так и внешних условий, от которых во многом это состояние зависит. С этой целью в настоящем исследовании была изучена межгодовая и сезонная динамика двух водоемов озера Мойнаки, различающихся своим гидрологическим режимом и уровнем антропогенного воздействия. Поскольку данное гиперсоленое озеро расположено в зоне активной рекреационной деятельности, полученные результаты могут иметь практическое приложение и быть полезны при разработке мер по реставрации экосистемы Мойнаки с целью повышения его рекреационной привлекательности и восстановления ресурсов.

В настоящее время часть озера (Мойнаки 2) при достаточно высоких летних температурах (более $+30^{\circ}\text{C}$) пересыхает, как видно на рисунке 2, и не может быть использована в рекреационных целях, но может представлять опасность для здоровья людей. Исследователями было отмечено, что пересыхающие озера, на дне которых происходит отложение солей, а также всевозможных ксенобиотиков (тяжелых металлов, органических загрязнителей, пестицидов и т.д.), представляют реальную угрозу для здоровья населения. В случае сильных ветров и штормов эти компоненты могут разноситься с песком и другими частицами на большие расстояния и вызывать разные патологии дыхательных путей (Tussupova et al., 2020).

Наши исследования показали, что ежегодно в апреле-мае в районе озера Мойнаки начинался резкий подъем температуры воздуха, которая достигала максимальных значений в июне-августе (свыше $+30^{\circ}\text{C}$), после чего она постепенно снижалась до минимальных значений в декабре-январе ($+2^{\circ}\text{C}$). Динамика изменения температуры в обоих водоемах озера была сходной, при этом

температура воды в Мойнаки 2 была выше, чем в Мойнаки 1, что объясняется тем, что этот водоем более мелкий и имеет меньшие размеры. Быстрее прогревается до критических температур. В исследуемых водоемах четко прослеживаются сезонные колебания солености, которые также были более выражены в Мойнаки 2, где этот показатель в 5-7 раз превышал соответствующие значения в Мойнаки 1, где этот параметр варьирует в меньшей степени. Такая же закономерность отмечена и для значений pH. Известно, что соленость и pH существенно колеблются в морях и в гиперсоленых водоемах как в течение дня, так и в различные сезоны, что определяется как концентрацией отдельных ионов, так и доминирующими буферными системами, соотношение которых в процессе испарения может меняться, что приводит к сдвигу pH (Аладин, Плотников, 2015; Golan et al., 2016; Li et al., 2016; Sirota et al., 2016; Markova et al., 2021)

Увеличение солености в двух водоемах совпадало с летне-осенним периодом, когда при достаточно высокой температуре и отсутствии осадков минерализация возрастала до критических величин в Мойнаки 2 (300-350‰), что сопровождалось полным пересыханием этой части озера и выпадением соли. Учитывая тот факт, что в эту часть водоема происходит сброс бытовых стоков, содержание опасных веществ, находящихся в них, может существенно увеличиться и накапливаться на дне Мойнаки 2 или же разноситься ветром на близлежащие территории, создавая опасность для здоровья человека (Glavaš et al., 2015; Guesdon et al., 2016).

Если эти явления будут повторяться ежегодно, то в Мойнаки 2 уровень вредных веществ может существенно возрасти и превысить нормативные значения. Повышение солености на фоне высокой температуры воздуха и воды, а также накопление вредных веществ в Мойнаки 2 может пагубным образом отразиться на функционировании экосистемы и биоты. В летние месяцы содержание кислорода в данном водоеме снижалось до критических величин (0.52 мл/л), что крайне неблагоприятно влияет на жизнедеятельность сообществ гидробионтов, в том числе микроорганизмов, которые участвуют в процессах минерализации и биотрансформации элементов в соленых озерах (Di Meglio et al., 2016). Помимо этого, снижение содержания кислорода в летний период обусловлено развитием в данном водоеме процессов эвтрофирования в весенний период, после чего дальнейшее повышение температуры и испарение воды приводит к повышению солености и его пересыханию.

Условия в водоемах определяют жизнедеятельность биоты, массовые представители которой могут служить видами-индикаторами экологического состояния водного объекта. Организмы-фильтраторы, к которым относится артемия, являются ключевыми компонентами многих водных экосистем и оказывают существенное влияние на их динамику, в том числе сезонную. Поскольку артемия – доминирующий вид в гиперсоленых озерах, изменения ее популяции являются удобной моделью для решения этих и других проблем, связанных с динамикой сообществ и влиянием внешних факторов на экосистему водного объекта (Sánchez et al., 2016; Wooldridge et al., 2016). Результаты наших исследований показали, что если цисты артемии присутствуют в обоих водоемах, то науплии и взрослые рачки были обнаружены только в Мойнаки 2 в 2020 году после периода его пересыхания и заполнения водой. При этом качество цист артемии, характеристикой которого служит процент вылупления науплиев из яиц, показал невысокое значение $16.1 \pm 1.1\%$, что может отражать отсутствие оптимальных условий для развития артемии в Мойнаки 2 и что отразилось на качестве цист рачка.

Таким образом, комплексное исследование сезонных флуктуаций гидрохимических и гидробиологических характеристик гиперсоленых водоемов может дать существенную информацию для понимания последствий совокупного влияния природных и антропогенных факторов применительно к конкретным географическим районам, а также определить степень экологического риска вследствие возникновения экстремальных ситуаций для этих водоемов (пересыхание) и последствий для экологии человека на примыкающих территориях

Выводы

1. Экологическое состояние двух водоемов озера Мойнаки имело четко выраженную межгодовую и сезонную изменчивость, зависящую от климатических условий и антропогенного влияния.

2. Годовые и сезонные закономерности изменения гидрохимических характеристик воды были в большей степени выражены в меньшем водоеме Мойнаки 1 по сравнению с большим Мойнаки 2.

3. Состояние популяции артемии зависело от экологического состояния водоема, в частности, от солености и температурных флуктуаций.

4. Поскольку озеро Мойнаки подвержено активному антропогенному воздействию, полученные результаты могут быть полезны при разработке мер по реставрации экосистемы с целью повышения ее рекреационной привлекательности и восстановления ресурсов.

Финансирование. Работа выполнена по теме государственного задания МГИ РАН 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»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аладин Н.В., Плотников И.С.* 2013. Концепция относительности и множественности зон солености и формы существования гидросферы // Труды Зоологического института РАН. № 3. С. 7-21
- Горячкин Ю.Н.* 2020. Изменения береговой зоны Евпатории за последние 100 лет // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. Т.1. С. 1-22.
- Гулов О.А.* 2007. Экоцид крымских соляных озер // Теория и практика восстановления внутренних водоемов. СПб: Лема. С. 60-78.
- Литвиненко Л.И., Литвиненко А.И., Бойко Е.Г., Куцанов К.В., Герасимов А.Г., Разова Л.Ф.* 2018. Влияние изменений климата на запасы цист артемии в озерах западной Сибири // Рыбное хозяйство. № 6. С. 52-59.
- Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А.* 2010. Формирование химического состава вод озер в условиях изменения окружающей среды. М.: Наука. 268 с.
- Akhmedenov K.M.* 2020. Tourist and recreational potential of the salt lakes of Western Kazakhstan // GeoJournal of Tourism and Geosites. Vol. 30. No. 2. Pp. 782-787.
- Di Meglio L., Santos F., Gomariz M., Almansa C., López C., Antón J., Nercessian D.* 2016. Seasonal Dynamics of Extremely Halophilic Microbial Communities in Three Argentinian salterns (Article) // FEMS Microbiology & Ecology. Vol. 92. Is. 12. Article No. fiw184.
- Glavaš N., Šmuc N.R., Dolenc M., Kovač N.* 2015. The Seasonal Heavy Metal Signature and Variations in the Microbial Mat (Petola) of the Sečovlje Salina (Northern Adriatic) // Journal of Soils and Sediments. Vol. 15. Is. 12. Pp. 2359-2368
- Golan R., I. Gavrieli I., Ganor J., Lazarc B.* 2016. Controls on the pH of Hyper-saline Lakes – A lesson from the Dead Sea // Earth and Planetary Science Letters. Vol. 434. Pp. 289-297.
- Guesdon G., Santiago-Martin A., Raymond S., Messaoud H., Michaux A., Roy S., Galvez R.* 2016. Impacts of Salinity on Saint-Augustin Lake, Canada: Water (Remediation Measures of Watershed Scale // Water (Switzerland). Vol. 8. Is. 7. Article No. 285.
- Li L., Song W., Deng C., Zhang D., Al-Misned F.A., Mortuza M.G., Gadd G.M., Pan X.* 2016. Effects of pH and Salinity on Adsorption of Hypersaline Photosynthetic Microbial Mat Exopolymers to Goethite: A Study Using a Quartz Crystal Microbalance and Fluorescence Spectroscopy // Geomicrobiology Journal. Vol. 33. Is. 3-4. Pp. 332-337.
- Markova N.V., Belokopytov V.N., Dymova O.A., Miklashevskaya N.A.* 2021. Assessment of the Black Sea Temperature and Salinity Climatic Fields for the Recent Climatological Period (1991-2020) // Physical Oceanography. Vol. 28 (4). Pp. 392-403.
- Rudneva I.I., Shaida V.G., Scherba A.V., Zav'yalov A.V.* 2021. Influence of Climatic Factors on Anterannual and Seasonal Dynamics of the Environmental State of the Salt Lake Adzhi-Baichi (Crimea) // Arid Ecosystems. Vol. 11. No. 4. Pp. 436-442.
- Sánchez M.I., Paredes I., Lebowier M., Green A.J.* 2016. Functional Role of Native and Invasive Filter-feeders, and the Effect of Parasites: Learning from Hypersaline Ecosystems // PLoS ONE. Vol. 11. Is. 8. Article No. e0161478.
- Sirota I., Arnon A., Lensky N.G.* 2016. Seasonal Variations of Halite Saturation in the Dead Sea // Water Resources Research. Vol. 52. Is. 9. Pp. 7151-7162.
- Tussupova K., Hjorth A.P., Morave M.* 2020. Drying Lakes: a Review on the Applied Restoration Strategies and Health Conditions in Contiguous Areas // Water. No. 12 (749). Pp. 1-23.
- Wooldridge T.H., Adams J.B., Fernandes M.* 2016. Biotic Responses to Extreme Hypersalinity in an Arid Zone Estuary // South Africa journal of Botany. Vol. 107. Pp. 160-169.