



# Трансформация экосистем Ecosystem Transformation [www.ecosysttrans.com](http://www.ecosysttrans.com)

## Влияние гидрометеорологических факторов на экологическое состояние гиперсоленого Сакского озера (Крым) в период 2017–2018 гг.

И.И. Руднева<sup>1\*</sup>, В.В. Чабан<sup>2</sup>, М.А. Голуб<sup>2</sup>,  
В.Г. Шайда<sup>1</sup>, А.В. Щерба<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, 299011, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2

<sup>2</sup>ГУ НПП РК «Крымская ГПРЭС», 296500, Республика Крым, г. Саки, ул. Курортная, д. 4.

\*[svg-41@mail.ru](mailto:svg-41@mail.ru)

Поступила в редакцию: 08.04.2020

Принята к печати: 13.05.2020

Опубликована онлайн: 27.07.2020

Corrigendum: 23.10.2020

DOI: 10.23859/estr-200408

УДК 577.115.3+577.359

ISSN 2619-094X Print

ISSN 2619-0931 Online

Для того чтобы выявить влияние гидрометеорологических условий на сезонные изменения экологического состояния Сакского соленого озера (г. Саки, Крым), в 2017 и 2018 гг. изучали динамику гидрохимических параметров воды (солености, содержания кислорода, температуры, pH, Eh) и изменения в популяции артемии, а также долю вылупления науплиев из цист. Наряду с увеличением температуры воздуха и воды в озере, снижением содержания кислорода и повышением солености рапы в летний период, установлены межгодовые различия, обусловленные особенностями гидрометеорологической ситуации. В течение всего года в воде обнаружены цисты артемии; науплии появляются в феврале – марте; максимальное количество всех жизненных стадий рачка отмечено в мае. Доля вышедших из цист, науплиев, собранных в холодное время года, существенно выше этого показателя в теплый сезон. Обсуждается возможность применения установленных закономерностей для анализа трансформации гипергалинных экосистем в условиях изменения климата и разработки мер для оптимального использования их минеральных и биологических ресурсов.

**Ключевые слова:** сезонные изменения, гидрохимические показатели, артемия, соленость, содержание кислорода, температура, pH, Eh.

Руднева, И.И., Чабан, В.В., Голуб, М.А., Шайда, В.Г., Щерба, А.В., 2020. Влияние гидрометеорологических факторов на экологическое состояние гиперсоленого Сакского озера (Крым) в период 2017–2018 гг. *Трансформация экосистем* 3 (3), 110–124.

### Введение

Глобальные биосферные процессы и хозяйственная деятельность модифицируют водные экосистемы, нарушают эволюционно сложившиеся гидродинамические и гидрохимические условия, что в конечном итоге может приводить к истоще-

нию ресурсов, ухудшению их качества или невозможности использования человеком. Изменение климатических условий влечет изменение других природных факторов, что в сочетании с нарастающим антропогенным воздействием негативно влияет на гидродинамику и стратификацию вод, их

минерализацию и тем самым нарушает жизнедеятельность гидробионтов (Гулов, 2007; Bradley et al., 2015; Huang et al., 2017; Liu et al., 2018).

Гиперсолёные озера широко распространены на планете, многие из них расположены в районах с высокой температурой воздуха и интенсивным испарением (Wooldridge et al., 2016). Такие водоемы характеризуются разными показателями солёности, рН, минерального состава, а также низким биоразнообразием. Их экосистемы очень уязвимы к изменению абиотических факторов, которое может приводить к необратимым нарушениям условий, сложившихся в этих водоемах за достаточно долгое время. Важным фактором стабильного функционирования озерно-грязевой экосистемы является биота, взаимодействие ключевых компонентов которой определяет важнейшие процессы продуцирования и деструкции органического вещества, лечебные свойства гидроминеральных ресурсов, токсичность грунтов и рапы при возникновении эвтрофирования и накопления загрязнителей, в том числе антропогенного происхождения (Vamba et al., 2017; Berman and Chava, 1999). Ресурсы гиперсолёных озера интенсивно используются в хозяйственной деятельности человека, поскольку минералы, содержащиеся в рапе, служат сырьем для предприятий химической промышленности; грунты применяются в лечебных целях в бальнеологии, косметической и фармацевтической индустрии; а основной доминирующий вид – жаброногий рачок артемия (*Artemia* sp.) – является ценнейшим стартовым кормом для объектов аквакультуры (Руднева, 1991; Lavens et al., 1986).

Данный рачок принадлежит к фильтраторам: он питается микроводорослями и взвешенными органическими частицами, что способствует просветлению воды в водоеме, образованию осадков, обладающих лечебными свойствами, и обеспечению нормального функционирования водоема (Shadkam et al., 2016).

Одним из наиболее крупных солёных озера Крымского полуострова является Сакское озеро (Рис. 1). В генетическом отношении оно представляет собой затопленное морскими водами русло древних балок. В них на протяжении тысячелетий под воздействием специфических гидрометеорологических, гидрогеологических, гидрохимических и биологических условий происходило формирование донных отложений, служащих природными лечебными ресурсами (Курнаков и др., 1936). Хозяйственное освоение солёного озера и прилегающих территорий имеет многовековую историю. В настоящее время Сакское озеро разделено на семь изолированных друг от друга бассейнов, два из которых лечебные, а остальные выполняют защитную функцию против паводковых и сточных вод. Для стабильного функционирования экосистемы озера в условиях интенсивного техногенеза организована сложная защитная гидротехническая система (ГТС). При помощи разделительных дамб, обводных каналов, насосных станций и вододелиителей осуществляется отведение от лечебных бассейнов избытка пресных вод из защитных водоемов и расположенных поблизости подтопляемых территорий. Для компенсации интенсивного испарения рапы в жаркое время года



Рис. 1. Карта расположения Восточного бассейна Сакского озера и место отбора проб.

при помощи ГТС из Каламитского залива Черного моря осуществляется подача морской воды, генетически близкой к рапе лечебных водоемов по своим гидрохимическим параметрам. Таким образом, осуществляется искусственное регулирование водно-солевого баланса, что, в свою очередь, обеспечивает благоприятные условия для развития гидробионтов.

На протяжении последних пятидесяти лет Восточный бассейн Сакского озера, являющийся участком добычи пелоидов (лечебных иловых сульфидных грязей) и озерной рапы, почти полностью был исключен из естественной системы питания поверхностными и грунтовыми водами и привносимыми ими продуктами почвенной эрозии. В этих условиях водоем практически трансформировался в грязевой бассейн, в котором геохимическая функция литосферы оказывает незначительное влияние на процесс формирования донных отложений. В результате в последние годы наблюдается некоторое приостановление естественного грязеобразования (Тютюнник и Хохлов, 2007; Чабан, 2013). В настоящее время озеро испытывает интенсивное антропогенное воздействие, в связи с чем возникает необходимость оценить изменения, происходящие в нем, с целью последующей разработки мероприятий по его охране и рациональному использованию ресурсов водоема. Цель данной работы – изучение взаимодействия совокупности гидрометеорологических и гидрохимических факторов, а также их влияния на популяцию артемии, обитающую в Восточном бассейне Сакского озера, в период 2017–2018 гг.

## Материалы и методы

Координаты месторасположения озера и участков отбора проб определяли с помощью смартфона Samsung Galaxy A5 (Samsung Electronics, CoLtd, Южная Корея). Образцы воды отбирали на глубине 10 см с помощью специального устройства. Все наблюдения выполнены на контрольном пункте водоема, имеющем координаты N 45°07'24.91", E 33°35'25.63" в системе WGS 84. Анализ метеорологической ситуации в районе Сакского озера проводили по результатам регулярных метеонаблюдений на стационарной гидрометеорологической площадке ГУ НПП РК «Крымская ГГРЭС». Минимальные и максимальные температуры воздуха определяли по минимальному и максимальному термометрам соответственно, сумму осадков, выпавших в исследуемые периоды – по осадкомеру Третьякова.

Температуру воды измеряли непосредственно в озере с помощью электронного термометра «HANNA Instruments Check Temp–1» (Россия). Показатели pH, окислительно-восстановительного потенциала (Eh) и содержания кислорода оце-

нивали в лабораторных условиях при помощи анализатора Expert–001 («Econix–Expert Моеха CoLtd», Россия) с использованием соответствующих селективных электродов фирмы «Вольта» (Россия). Соленость воды измеряли с помощью рефрактометра PAL–06S LTA GO (Япония) и выражали в промилле (‰). Перед определением всех параметров образцы воды выдерживали в холодильнике при +4° С в течение 4–6 часов. Все измерения проводили в лаборатории Экотоксикологии ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН.

Гидробиологические исследования проводили на контрольном пункте (КП) Восточного бассейна. С целью дальнейшего определения размерно-возрастных групп артемии отбор образцов рапы осуществляли ежемесячно путем фильтрации 100 л воды через планктонную сеть с размером ячеек 42 мкм. Идентификацию разных онтогенетических стадий артемии и подсчет их количества проводили под биноклем МБС–10 и микроскопом Carl Zeiss Axio Scope A1. Все гидробиологические исследования и обработка результатов режимных наблюдений выполнялись в Лаборатории биологических исследований ГУ НПП РК «Крымская ГГРЭС» (Хохлов и др., 2018, 2019).

Для определения качества цист артемии их собирали на побережье озера ежемесячно в течение 2017 и 2018 гг.; отмывали и подсушивали согласно общепринятым рекомендациям (Van Stappen, 1996). После этого образцы помещали в стандартные условия (соленость среды инкубации 35‰, температура +25° С в течение 48 ч) при периодическом перемешивании с целью определения доли вылупления науплиев из цист. Эту величину рассчитывали как отношение числа выклюнувшихся через 48 ч личинок к числу помещенных в инкубационную среду цист.

Все определения проводили в трех повторностях. Статистические различия между исследуемыми показателями находили с помощью теста Стьюдента при уровне значимости  $p < 0.05$  (Халафян, 2008). Доля выклюнувшихся из цист науплиев представлена в виде среднего арифметического ( $M$ ) и ошибки среднего ( $m$ ).

## Результаты

### **Метеорологические характеристики района Сакского озера**

На протяжении периода наблюдений в 2017–2018 гг. метеорологическая обстановка в районе Сакского озера оставалась стабильной, экстремальных проявлений климатических факторов не отмечалось.

Среднемесячная температура воздуха соответствовала многолетним сезонным циклам:

плавно возрастала в весенне-летний период и снижалась в осенние месяцы. В 2018 г. отмечена более теплая зима и весна (за исключением марта), чем в 2017 г. (Рис. 2). Наиболее низкая температура (зафиксированная в январе 2017 г.) составила  $-13.0$  °С, а наиболее высокая (в августе 2017 г.) достигала  $+39.0$  °С.

Сравнительный анализ суммы выпавших осадков показал, что в 2018 г. их было на 169.6 мм меньше, чем в 2017 г. (Рис. 3). Кроме того, если в 2017 г. осадки полностью отсутствовали лишь в октябре, то в 2018 г. их не было в мае, июле и сентябре.

### **Гидрохимические характеристики рапы Восточного бассейна Сакского озера**

Температура рапы в озере последовательно увеличивалась, достигнув наибольших значений в августе ( $+34.6$  °С в 2017 г. и  $+32.1$  °С в 2018 г.), после чего снижалась в осенне-зимний период до  $+1.5$ – $2.4$  °С (Рис. 4).

Колебания солености рапы, представленные на Рис. 5, показали сходную динамику в исследуемые годы. Если в марте – апреле минерализация составляла 140–170‰, то в летний период этот показатель увеличивался, достигая максимума в ноябре (220–249‰), после чего снижался. Следует отметить, что соленость рапы весной 2017 г. была выше, чем в этот же период в 2018 г. Летом 2017 и 2018 гг. эти показатели имели близкие значения, а осенью 2018 г. соленость воды была выше, чем в 2017 г.

Содержание кислорода в рапе Восточного бассейна Сакского озера варьировало в пределах 8.2–14.9 мг/л в 2017 г. и 5.0–12.5 мг/л в 2018 г. (Рис. 6). При этом, если в 2017 г. минимальные значения были установлены в июле (8.2 мг/л), а максимальные – в августе (14.9 мг/л), то в 2018 г. наименьшие показатели отмечались в мае и июне (5.0 мг/л), а наибольшие – также в августе (12.5 мг/л). Далее тенденция была одинакова – происходило снижение содержания кислорода в сентябре и некоторое увеличение данного показателя в осенне-зимний период.

Окислительно-восстановительный потенциал (Eh) рапы незначительно колебался в 2017 г. от  $-40.8$  мВ до  $-46.0$  мВ (Рис. 7). В 2018 г. различия были более заметны: в зимний период показатели были ниже ( $-48.8$  мВ); в мае – июне они увеличивались до  $-35.5$  мВ, после чего снижались до  $-44.2$  мВ.

Изменения pH рапы в исследуемые годы также были незначительными – от 7.2 до 7.4 в 2017 г. и от 7.1 до 7.4 в 2018 г. (Рис. 8). Можно отметить некоторое снижение pH с мая по сентябрь в 2018 г. по сравнению с этим периодом в 2017 г. и показателями зимнего периода.

### **Динамика популяции артемии в Восточном бассейне Сакского озера**

Динамика численности разных жизненных стадий артемии в 2017–2018 гг. приведена на Рис. 9. Как можно видеть, в исследуемые периоды отмечены четыре жизненные стадии рачка: цисты, науплии, ювенильные особи и половозрелые самки. При этом цисты обнаруживались в течение всего года как в 2017, так и в 2018 гг, однако численность их изменялась в зависимости от месяца и года. В 2017 г. количество цист рачка возросло в феврале по сравнению с показателями января, затем снизилось в марте – апреле и вновь резко увеличилось, достигая максимальных величин (16000 и 46600 экз/м<sup>3</sup>) в мае и июне, после чего последовал спад вплоть до ноября. В ноябре количество цист существенно увеличилось (до 12680 экз/м<sup>3</sup>), но в декабре их число опять сократилось.

Динамика количества яиц артемии в воде Восточного бассейна Сакского озера в целом была сходна с той, что наблюдалась в 2017 г., однако были и отличия. Высокие показатели отмечены в мае, июне и июле (47760, 24050 и 26920 экз/м<sup>3</sup> соответственно); в августе численность снизилась более чем в 10 раз; в сентябре снова достигла величины 21680 экз/м<sup>3</sup>; в октябре упала; в ноябре вновь незначительно возросла, после чего последовательно снижалась до минимальных величин в зимние месяцы. Таким образом, максимальное содержание цист в воде наблюдалось в мае – июле 2017 г. и в мае – июне 2018 г., однако в другие исследуемые месяцы имелись существенные различия.

Первые науплии в 2017 г. появлялись в феврале, в марте их численность возросла, но в апреле снизилась почти в 3 раза. В остальные месяцы 2017 г. личинки артемии в период отбора проб не отмечены. В 2018 г. первые науплии были обнаружены в марте, их незначительное количество присутствовало также в июне и в июле.

В 2017 г. ювенильные (неполовозрелые особи) артемии появились в апреле (около 2000 экз/м<sup>3</sup>), а в мае их численность возросла почти в 10 раз, достигнув 21000 экз/м, после чего (в июне) резко упала. В 2018 г. неполовозрелые рачки были обнаружены только в июне в небольших количествах.

В 2017 г. самая высокая численность половозрелых самок рачка была установлена в мае (свыше 1000 экз/м<sup>3</sup>), в летне-осенний период она резко снизилась; в декабре данная возрастная группа не обнаруживалась. Такая же тенденция отмечена и в 2018 г., однако количество половозрелых рачков было значительно выше (около 6000 экз/м<sup>3</sup>), после чего число представителей данной группы резко падало и исчезало в конце ноября – декабре.



Рис. 2. Сезонные среднемесячные значения температуры воздуха в районе Сакского озера.

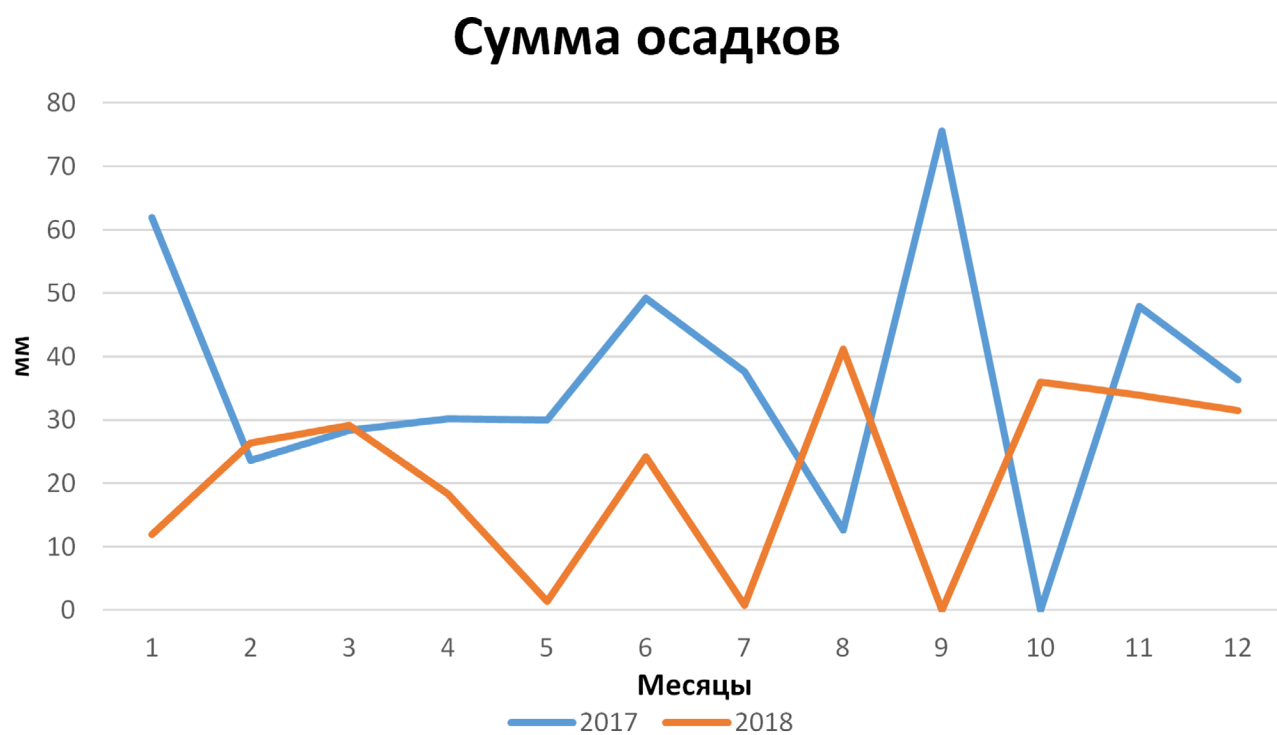


Рис. 3. Сезонные изменения суммы осадков в районе Сакского озера.

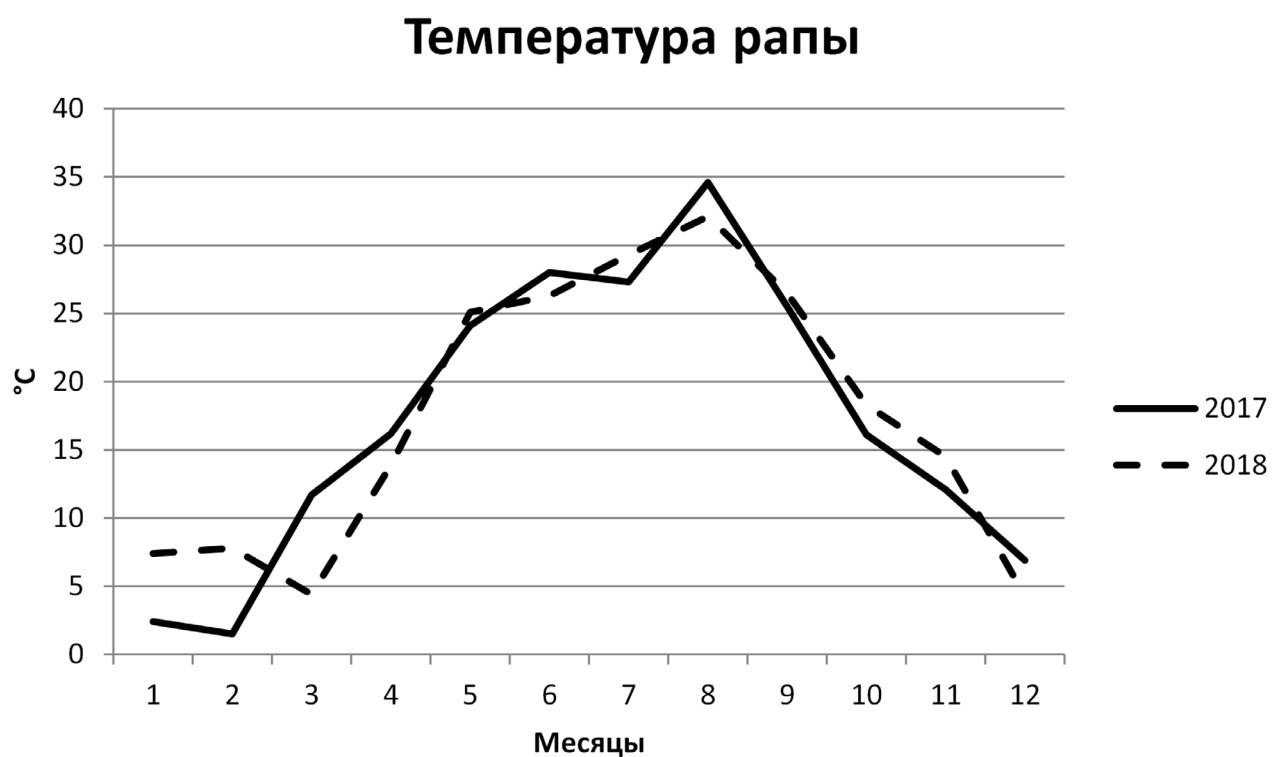


Рис. 4. Сезонные изменения температуры рапы в Восточном бассейне Сакского озера.

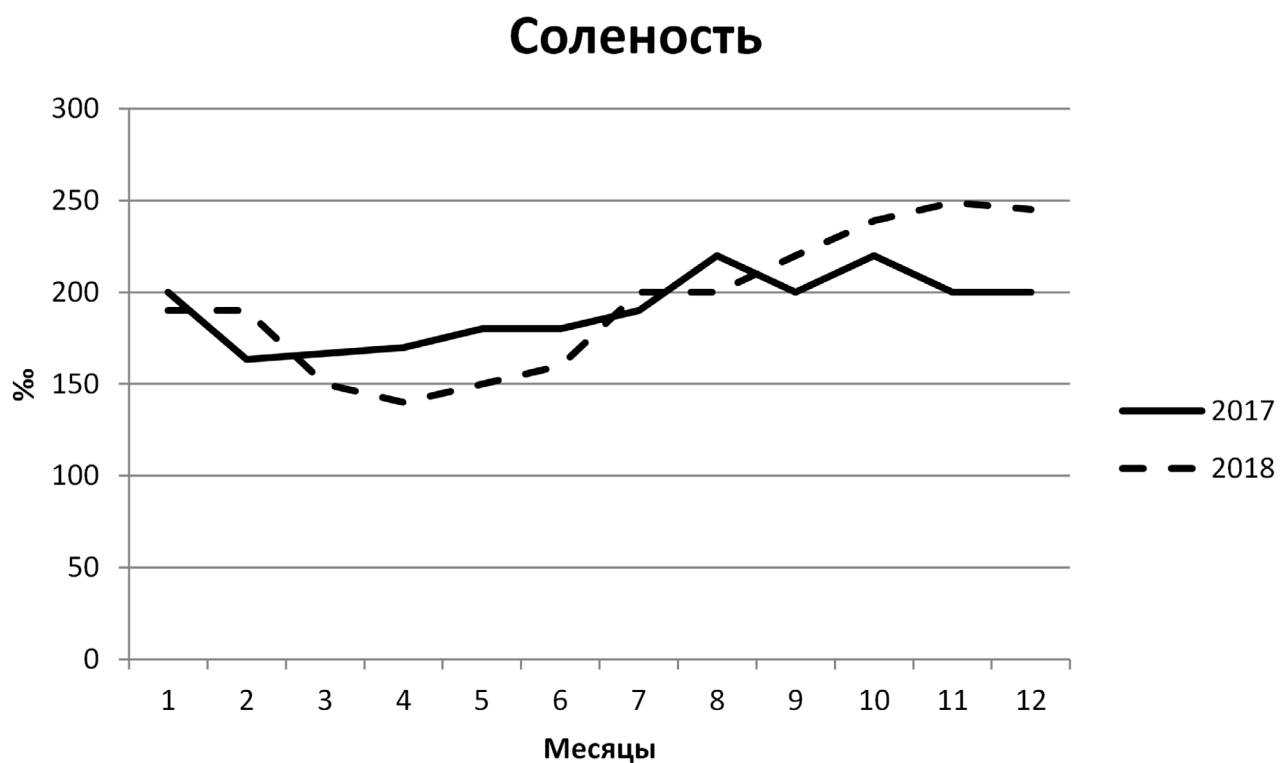


Рис. 5. Сезонные изменения солености рапы в Восточном бассейне Сакского озера.



Рис. 6. Сезонные изменения содержания кислорода в рапе Восточного бассейна Сакского озера.

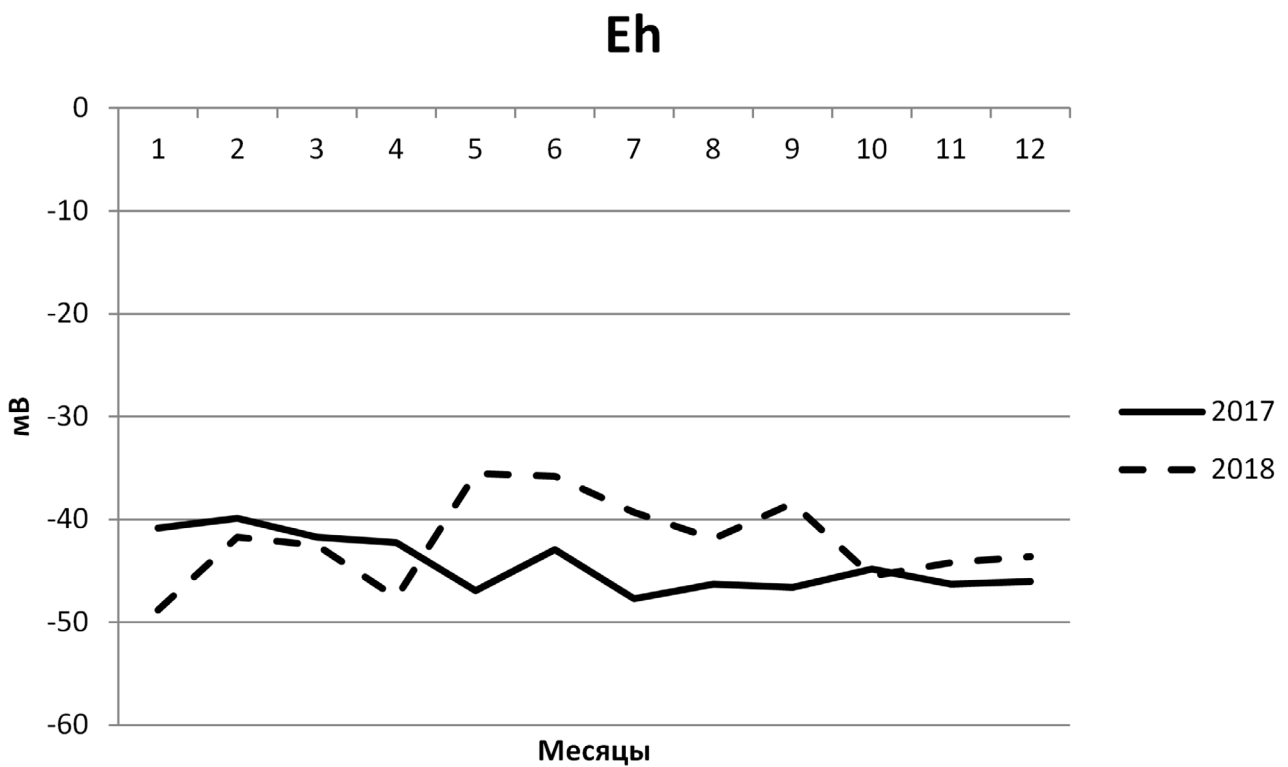


Рис. 7. Сезонные изменения Eh в рапе Восточного бассейна Сакского озера.

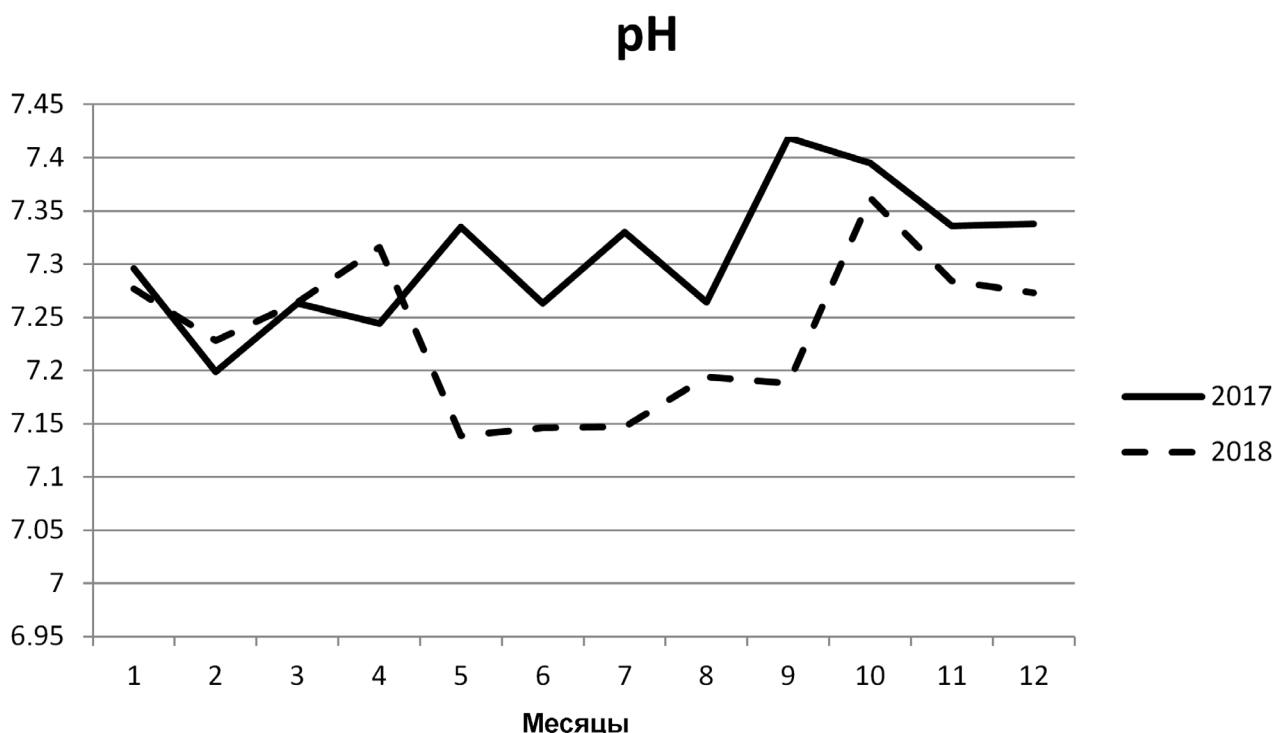


Рис. 8. Сезонные изменения pH рапы Восточного бассейна Сакского озера.

Отметим, что динамика численности разных жизненных стадий артемии в Восточном бассейне Сакского озера в 2017 и в 2018 гг. имела как сходные тенденции, так и различия. Кроме того, обнаружены различия показателей выклева науплиев из цист артемии, собранных в разные месяцы на берегу Сакского озера (Рис. 10). Основываясь на представленных данных, можно сделать вывод, что доля выклюнувшихся личинок рачка наиболее высока для яиц, собранных в прохладное время года как в 2017 г., так и в 2018 г, за исключением показателей цист, собранных в августе 2018 г. Самая высокая доля выклева личинок в 2017 г. отмечена в феврале (21.5%), а в 2018 г. – в марте (43%). В летние месяцы доля выклюнувшихся из цист личинок существенно снижалась, а в осенне-зимний период возрастала. Кроме того, в период с января по апрель доля выклюнувшихся науплиев из цист, собранных в 2018 г, достоверно превышала ( $p < 0.05$ ) соответствующие показатели цист, собранных в этот же период в 2017 г.

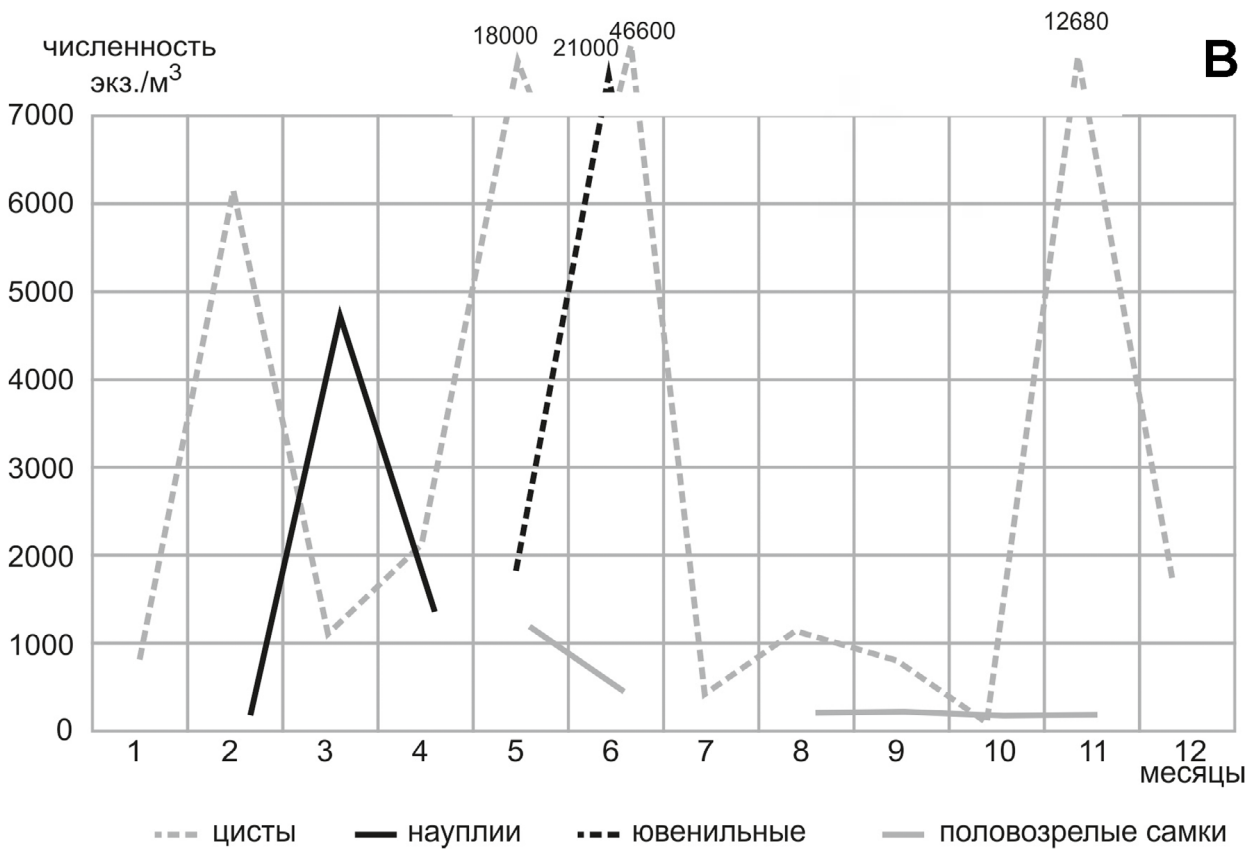
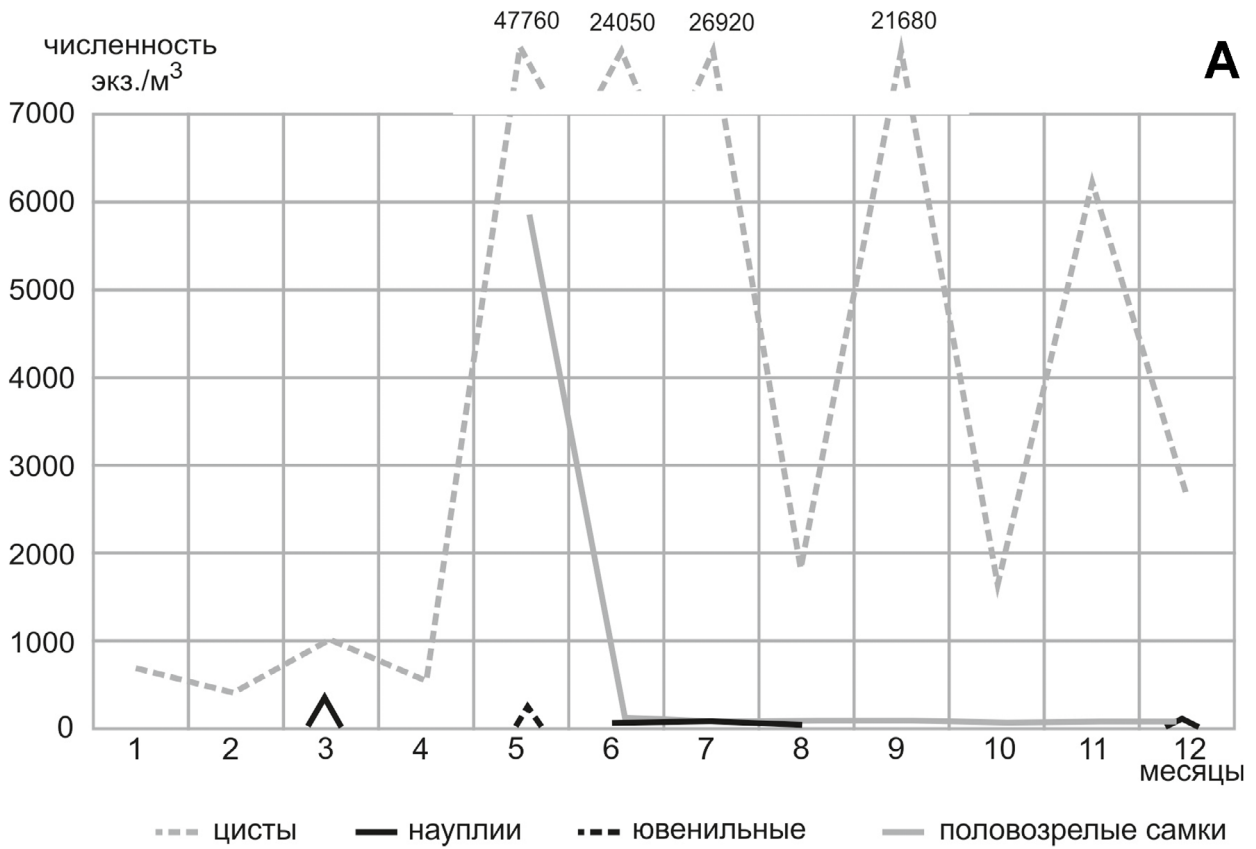
### Обсуждение результатов

Для понимания механизмов, определяющих функционирование водной экосистемы, необходимо комплексное исследование совокупности природных и антропогенных факторов, оказывающих прямое и косвенное воздействие на динамику процессов, происходящих в водном объекте в течение определенного времени. Проведенные нами исследования позволили установить основ-

ные тенденции сезонных изменений гидрометеорологических факторов в районе Сакского озера, а также проследить их влияние на сезонные колебания гидрохимических показателей воды и состояние популяции артемии.

Поскольку Восточный бассейн Сакского гиперсоленого озера используется для лечебных целей и находится в зоне активной рекреационной деятельности, полученные результаты могут иметь значение при разработке мер по оптимальному использованию его гидроминеральных и биологических ресурсов. Это обусловлено тем, что процесс формирования пелоидов (лечебных илов) в Сакском озере происходит в результате осаждения органического вещества с последующей трансформацией его гидробионтами. Основным поставщиком данных органических компонентов является автохтонная биота – планктонные и бентосные беспозвоночные (мелкие ракообразные, некоторые насекомые и их личинки), микро- и макроводоросли. Кроме того, на фоне существенных климатических изменений в настоящее время (IPCC, 2013) эти процессы могут изменяться, что может привести к нарушению эволюционно сложившихся отношений в экосистеме соленого озера.

В ходе наших исследований установлено, что зима и весна в 2018 г. были более теплыми, чем в 2017 г. Среднемесячная температура также была выше в 2018 г., особенно в летние месяцы. В то же время осадков в 2018 г. выпало на 169.6 мм меньше, чем в 2017 г. (в первом случае осадки отсут-



**Рис. 9.** Сезонное распределение и численность разных жизненных стадий артемии в воде Восточного бассейна Сакского озера в 2017 г. (А) и в 2018 г. (В).

ствовали в течение трех месяцев, во втором – в течение одного месяца). В эти периоды в районе расположения Сакского озера формировались засушливые зоны. В областях с засушливым климатом по всему миру достаточно много эстуариев и внутренних водоемов, соленость которых существенно выше, чем в океане и морях. Эти водоемы, находящиеся в непосредственной близости к морю, в теплое время года могут высыхать, а затем снова наполняются морской водой или осадками вплоть до значительного распреснения. Таким образом, гиперсоленость для таких водоемов является сезонным явлением и обусловлена интенсивным испарением в теплый период года. В то же время гиперсоленые озера, особенно материковые, характеризуются постоянством высокого уровня минерализации. К последней категории относится и Сакское озеро, поэтому изменения метеорологической обстановки оказывают существенное влияние на его гидрохимические характеристики.

Установлено, что в 2017–2018 гг. температура рапы в озере последовательно увеличивалась в весенний период, достигая максимальных значений (выше  $+30^{\circ}\text{C}$ ) в июле – августе, после чего снижалась. Температура воды в зимний период 2018 г. была выше, чем в 2017 г., что также отразилось на жизнедеятельности артемии в озере, о чем будет сказано ниже.

Еще одним важным гидрометеорологическим фактором, влияющим на экологическое состояние водоема в целом и на функционирование

организмов в нем, является движение воздушных масс, формирующих устойчивые нагонные зоны на берегах озера в течение года. Ветер определяет степень перемешивания вод и их вертикальную стратификацию, а также перелив морской воды через песчаный барьер в озеро (Hetzl et al., 2015; Kompaniets and Jakubailik, 2015).

Гидрометеорологическая ситуация в районе озера существенным образом повлияла и на гидрохимические показатели воды. На протяжении двух лет наблюдалась одинаковая тенденция снижения солености в зимне-весенний период и затем ее нарастание в летне-осенний. Если весной величины солености находились в пределах 140–170‰, то в августе – сентябре они увеличивались до 200–240‰. Весеннее снижение солености в Восточном бассейне Сакского озера может быть обусловлено как попаданием паводковых вод, так и атмосферными осадками, количество которых в данном районе увеличивается в это время года. Сходные сезонные явления колебания солености наблюдали и в других гиперсоленых озерах (Geldenhuis et al., 2016; Mitchell et al., 2017). Вместе с тем следует отметить межгодовые различия показателей солености в водоеме. В 2017 г. количество осадков в феврале и марте существенно превышало соответствующие значения в 2018 г., что привело к снижению солености в водоеме, сохранявшемуся вплоть до июня 2017 г. (Рис. 4, 5). Однако с мая по июль отмечена противоположная тенденция: в 2018 г. количество осадков было выше, чем в

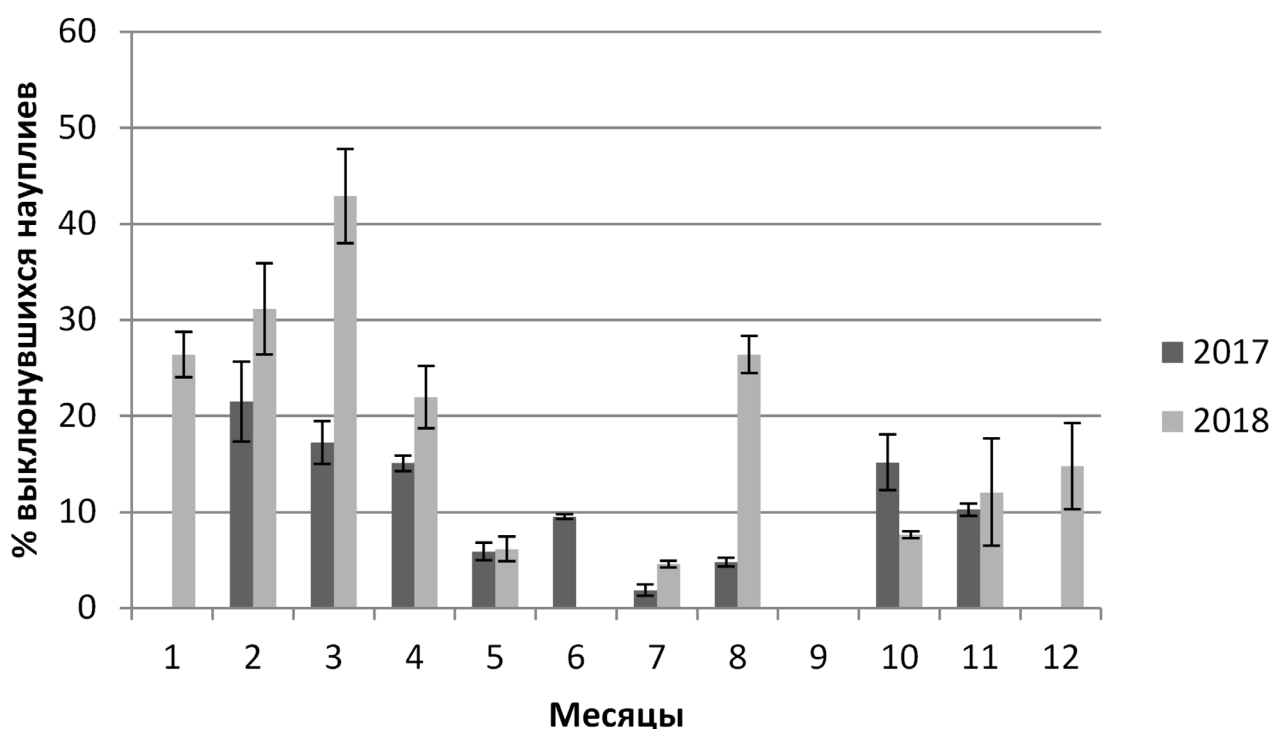


Рис. 10. Доля выклева науплиев из цист артемии, собранных в Восточном бассейне Сакского озера (%),  $M \pm t$ , где  $M$  – среднее значение,  $t$  – ошибка среднего).

2017 г., и к сентябрю 2018 г. соленость в Восточном бассейне превышала соответствующие показатели 2017 г. Полученные данные свидетельствуют о сезонной зависимости гидрохимических показателей рапы от гидрометеорологической ситуации.

Содержание кислорода в рапе также имело выраженную сезонную зависимость: снижалось в мае – июне вследствие процессов эвтрофирования, что характерно и для других озер (Vamba et al., 2017). К августу эти показатели возрастали и приобретали максимальные значения, однако в 2017 г. они колебались в меньшей степени, чем в 2018 г. Резкое сокращение содержания кислорода в мае – июне 2018 г. может быть связано с уменьшением количества осадков, снижением степени перемешивания воды, а также образованием «застойных зон», где активно происходят процессы разложения органического вещества (отмерших рачков, микроводорослей и т.д.).

Важнейшими показателями экологического состояния водоема, определяющего условия существования в нем гидробионтов, являются pH и Eh среды (Hargrave et al., 2008). В воде Восточного бассейна Сакского озера в течение 2017 и 2018 гг. Eh и pH варьировали незначительно. В то же время можно отметить стабильное снижение pH в мае – июле 2018 г., что согласуется со снижением содержания кислорода и повышением окислительно-восстановительного потенциала, отмеченными в этот же период. Данные явления, вероятно, обусловлены усилением деструкции органических веществ, масса которых увеличивается в этот сезон за счет отмерших рачков, микроводорослей и др.

Среди биоты соленых озер наиболее распространенными видами являются жаброногий рачок *Artemia* sp., донные личинки комаров семейства Chironomidae, галофильные микроорганизмы (в том числе комплекс диатомей, образующих на дне мощную «корку») и водоросли, основную массу которых формирует макрофит *Cladophora siwaschensis*. Именно сообщество этих гидробионтов и степень их развития определяют направленность продукционных и деструкционных процессов при образовании донных отложений. Поскольку артемия является доминирующим видом в гиперсоленых озерах, изменения в ее популяции отражают динамику процессов в экосистеме, происходящих под влиянием внешних факторов, включая гидрометеорологические (Sánchez et al., 2016; Xin, 2004).

Современное экологическое состояние Сакского озера существенно отличается от отмеченного в прошлом (Голуб и др., 2007; Тютюник и Хохлов, 2007). До разделения озера дамбами жизнедеятельность гидробионтов в озере зависела от сезонных колебаний уровня рапы и ее солености. Смена периодов полного или частичного пересыхания с периодами заполнения акватории озера в

сезон дождей или в результате размыва морской пересыпи с последующим снижением уровня минерализации являлась необходимым условием для размножения и активной жизнедеятельности *Artemia* sp. и анаэробной деструкции органических остатков. Появление во время засухи обширных осушенных зон, необходимых для ангидробриоза цист рачка, и их весенняя активация насыщенными кислородом опресненными водами были главными условиями дальнейшего развития популяции артемии. С началом искусственного регулирования гидрологического режима Восточного бассейна и поддержанием стабильного уровня рапы на протяжении года в диапазоне от –0.8 м. абс. выс. до –1.2 м. абс. выс. первоначальные условия в экосистеме изменились, определяющими стали гидрометеорологические факторы (Тютюник и Хохлов, 2007; Шкловский, 2016).

Проведенные исследования показали, что на динамику численности разных жизненных стадий артемии непосредственно влияла температура рапы, зависящая от сезона. Так, первые науплии появлялись в феврале – марте, когда температура рапы приближается к +10 °С, а наиболее интенсивное развитие популяции артемии, выражающееся в росте численности всех жизненных стадий, установлено в мае – июне, когда вода в озере прогревалась до +18...+28 °С. В этот же период в экосистеме складывались благоприятные кормовые условия для артемии в результате интенсивного развития фитопланктона и поступления взвешенного и растворенного органического вещества.

От протяженности теплого периода, когда рапа находится в прогретом состоянии, зависит количество генераций рачка (как правило, этот показатель колеблется от 2-х до 4-х поколений в год). Другие гидрохимические условия в водоеме также могут являться лимитирующими факторами для жизнедеятельности *Artemia* sp. В частности, изменения в ионном составе рапы при увеличении ее минерализации до 190 г/дм<sup>3</sup> и более приводят к угнетению популяции. Снижение концентрации кислорода, эвтрофирование, образование «заморных зон» – все эти факторы способствуют гибели артемии, в результате чего в прибойной зоне можно наблюдать большое количество отмерших особей на разных жизненных стадиях. Как правило, такие условия складываются в наиболее жаркие летние месяцы – июль и август. Однако перед гибелью рачки образуют цисты, численность которых значительно увеличивается в этот период как в воде, так и по берегам озера.

Образование выбросов цист на побережье зависит от движения воздушных масс, формирующих устойчивые нагонные зоны на берегах озера в течение года. Поскольку в районе расположения озера доминируют северо-восточные и юго-за-

падные направления ветра, обширные нагонные зоны, необходимые для последующего осушения и ангидробиоза яиц артемии, формируются с учетом морфологии дна вдоль его восточного берега (Хохлов и др., 2018, 2019). При этом доля вылупившихся науплиев из цист, сконцентрированных по берегам, может существенно различаться как по разным сезонам, так и по годам. Показатели выклева науплиев из цист, собранных в зимне-весенний период (январь – апрель), были наиболее высоки, а в конце весны и летом (вплоть до июля) последовательно снижались. Осенью величины выклева науплиев опять возрастали. Увеличение выклева в прохладные месяцы по сравнению с этим показателем в более теплое время обусловлено низкой температурой и отсутствием осадков.

Снижение солености воды весной в результате таяния снега и выпадения атмосферных осадков приводит к необратимой гидратации цист, стимулирует эмбриогенез, однако дальнейшее развитие личинок в условиях пониженной температуры и отсутствия достаточной кормовой базы невозможно (Sugumar, 2012; Sura and Belovsky, 2016). Этим объясняется резкое снижение доли выклева науплиев из цист, собранных в марте и последующие месяцы. Обращает на себя внимание относительно высокая доля выклева в августе 2018 г. Вероятно, в этот период в водоеме сложились благоприятные условия для образования артемией так называемых «летних цист», отличающихся более тонкой оболочкой (кутикулой). Дальнейшее развитие науплиев, вылупившихся из таких цист, происходит при наличии достаточной кормовой базы и соответствующих гидрохимических параметров (содержания кислорода, pH, температуры и солености) (van Stappen, 1996; Rudneva et al., 2005, 2008), что характерно для экосистемы Восточного бассейна Сакского озера в осенний период 2018 г. Полученные данные могут быть полезны для оптимизации времени, в которое организуется добыча цист артемии в Сакском озере.

На основании проведенных исследований можно заключить, что экологическое состояние Восточного бассейна Сакского гиперсоленого озера имело четко выраженную сезонную изменчивость, обусловленную влиянием гидрометеорологических факторов. Увеличение температуры воздуха в летний период вплоть до экстремальных значений, отсутствие осадков и сильное испарение, направление ветра – важнейшие факторы изменения гидрохимических характеристик озера, приведшие к повышению температуры воды, солености, снижению содержания в ней кислорода, изменению pH и Eh. Совокупность данных параметров определяет цикличность развития гидробионтов, что следует учитывать при проведении искусственного регулирования водно-солевого режима озерной экосисте-

мы. Это позволит исключить появление осушенных зон на берегах в летне-осенний период и наполнить озеро количеством воды, достаточным для весенней активации яиц *Artemia* sp. и дальнейшего развития популяции рачка. В период естественного понижения уровня воды необходимо поддерживать ее минерализацию в пределах 150 г/дм<sup>3</sup> для предотвращения угнетения популяций гидробионтов. Кроме того, установленная динамика выклева науплиев из цист артемии, которая выше в холодные месяцы, может способствовать разработке мероприятий по их сбору и дальнейшему использованию для целей аквакультуры.

## Заключение

Таким образом, комплексное исследование сезонных флуктуаций метеорологических, гидрохимических и гидробиологических характеристик гиперсоленых водоемов может дать важную информацию для понимания их трансформаций в условиях изменения климата и нарастающей антропогенной деятельности в конкретных географических условиях. Результаты показали, что искусственное регулирование водно-солевого режима Восточного бассейна Сакского озера с учетом гидрометеорологических факторов в данном районе обеспечивает благоприятные условия для развития зоопланктона в экосистеме, что особенно показательно при анализе динамики популяции *Artemia* sp., учитывающем появление первых науплиев, их дальнейшее развитие, распределение и соотношение разных жизненных стадий рачка, формирование и количество цист, а также их качество, оцениваемое по доле вылупления науплиев. Для оптимального развития популяции артемии и ее жизнедеятельности следует искусственно регулировать водно-солевой режим, при котором необходимо поддерживать среднегодовую минерализацию рапы на уровне 150 г/дм<sup>3</sup>. Кроме того, необходимо учитывать преобладающие направления движений воздушных масс, от которых зависит образование устойчивых нагонных зон, необходимых для успешного протекания полного жизненного цикла артемии и образования выбросов цист, которые могут быть собраны на побережье для дальнейшего использования. В этом случае антропогенное влияние на экосистему Сакского озера может иметь положительный эффект, позволяющий сохранить экосистему и нормальное функционирование ее обитателей, а также оптимально использовать его гидрохимические и биологические ресурсы.

## Благодарности

Работа частично выполнена по теме государственного задания ФИЦ ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН «Функциональные, метаболиче-

ские и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом», № ААА-А-А18-118021490093-4.

### Список литературы

- Голуб, М.А., Гулов, О.А., Козенцева, Ю.А., Хохлов, В.А. 2007. Экспериментальные работы по изучению процессов сульфатредукции и антимикробных свойств лечебной грязи Сакского озера. *Сборник статей специалистов ДП «Сакская ГГРЭС» 1995–2007 гг.*, 10–12.
- Гулов, О.А., 2007. Экоцид крымских соляных озер. В: Румянцев, В.А. и Кондратьев, С.А. (ред.), *Сборник трудов международной научно-практической конференции «Теория и практика восстановления внутренних водоемов»*. Лема, Санкт-Петербург, Россия, 60–78.
- Курнаков, Н.С., Кузнецов, В.Г., Дзенс-Литовский, А.И., Равич, М.И., 1936. Соляные озера Крыма. Издательство АН СССР, Москва–Ленинград, СССР, 278 с.
- Руднева, И.И., 1991. Артемия: перспективы использования в народном хозяйстве. Наукова думка, Киев, Украина, 138 с.
- Тютюник, Е.В., Хохлов, В.А., 2007. Практическое значение биологических исследований на Сакском грязевом месторождении. *Сборник статей специалистов ДП «Сакская ГГРЭС» 1995–2007 гг.*, 53–58.
- Халафян, А.А., 2008. Статистика 6. Статистический анализ данных. Бином-Пресс, Москва, Россия, 512 с.
- Хохлов, В.А., Васенко, В.И., Чабан, В.В., Гуськова, Н.В., Воловод, П.А. и др., 2018. Геоэкологическое изучение, режим, эксплуатация и горно-санитарная охрана месторождений гидроминеральных ресурсов Республики Крым в зоне действия ГУ НПП РК «Крымская ГГРЭС». Отчет о научно-практической работе за 2017 г. ГУ НПП РК «Крымская ГГРЭС», Саки, Республика Крым, 255 с.
- Хохлов, В.А., Васенко, В.И., Чабан, В.В., Гуськова, Н.В., Воловод, П.А. и др., 2019. Геоэкологическое изучение, режим, эксплуатация и горно-санитарная охрана месторождений гидроминеральных ресурсов Республики Крым в зоне действия ГУ НПП РК «Крымская ГГРЭС». Отчет о научно-практической работе за 2018 г. ГУ НПП РК «Крымская ГГРЭС», Саки, Республика Крым, 251 с.
- Чабан, В.В., 2013. Влияние техногенных изменений геологической среды на экологическое состояние Сакского соленого озера. *Вестник Днепродзержинского национального университета. Серия «Геология. География»* 2 (16), 77–84.
- Шкловский, О.А., 2016. Технологическая схема разработки рапы озерной Сакского месторождения, курорт Саки, Республика Крым. ООО «Геоминвод», Москва, Россия, 158 с.
- Bamba, D., Coulibaly, M., Robert, D., 2017. Nitrogen-containing organic compounds: origins, toxicity and conditions of their photocatalytic mineralization over TiO<sub>2</sub>. *Sciences of the Total Environment* 580, 1489–1504. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.130>
- Berman, T., Chava, S., 1999. Algal Growth on Organic Compounds as Nitrogen Sources. *Journal of Plankton Research* 21 (8), 1423–1437. <https://doi.org/10.1093/plankt/21.8.1423>
- Bradley, M., van Putten, I., Sheaves, M., 2015. The pace and progress of adaptation: marine climate change preparedness in Australia's coastal communities. *Marine Policy* 53, 13–20. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2014.11.004>
- Goldenhuis, Ch., Cotiyane, Ph., Rajkaran, A., 2016. Understanding the creek dynamics and environmental characteristics that determine the distribution of mangrove and saltmarsh communities at Nahoon Estuary. *South African Journal of Botany* 107, 137–147. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.04.013>
- Hargrave, B.T., Holmer, M., Newcombe, C.P., 2008. Towards a classification of organic enrichment in marine sediments based on biochemical indicators. *Marine Pollution Bulletin* 56 (5), 810–824. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.02.006>
- Hetzel, Y., Pattiaratchi, C., Lowe, R., Hofmeister, R., 2015. Wind and tidal mixing controls on stratification and dense water outflows in a large hypersaline bay. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 120 (9), 6034–6056. <https://doi.org/10.1002/2015JC010733>
- Huang, J., Xu, C.-C., Ridoutt, B.G., Wang, X.-C., Ren, P.-A., 2017. Nitrogen and phosphorus losses and eutrophication potential associated with fertilizer application to cropland in China. *Journal of Cleaner Production* 159, 171–179. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.008>

- IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Kompaniets, L.A., Iakubailik, T.V., 2015. Observations of hydrophysical characteristics of stratified salt lake Shira (Siberia) as an important part of environmental monitoring. Proceedings of the 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConferences SGEM2015. Albena, Bulgaria, 635–641.
- Lavens, P., Tackaert, W., Sorgeloos, P., 1986. International Study on *Artemia*. XLI. Influence of culture conditions and specific diapause deactivation methods on the hatchability of *Artemia* cysts produced in a standard culture system. *Marine Ecology Progressive Series* **31** (2), 197–203.
- Liu, H., Chen, Z., Guan, Y., Xu, S., 2018. Role and application of iron in water treatment for nitrogen removal: a review. *Chemosphere* **204**, 51–62. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.019>
- Mitchell, S., Boateng, I., Couceiro, F., 2017. Influence of flushing and other characteristics of coastal lagoons using data from Ghana. *Ocean and Coastal Management* **143**, 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.10.002>
- Rudneva, I.I., Shaida, V.G., Gulov, O.A., Kovrigina, N.P., Omelchenko, S.O., Symchuk, G.V., 2005. The current situation and perspectives on sustainable resource management of the Crimean salt lakes. *Extended Abstracts of 1st Plenary Meetings and field Trip of Project IGCP-521 Black Sea-Mediterranean Corridor during the Last 30 KY: Sea Level Changes and Human Adaptation (2005–2009), October 8–15, Istanbul*. Istanbul, Turkey, 158–160.
- Rudneva, I.I., Shaida, V.G., Omelchenko, S.O., Symchuk, G.V., 2008. Seasonal variations of several ecological parameters of hypersaline Crimean lakes. *Biology of Inland Waters* **2**, 25–30.
- Stappen, van G., 1996. Use of cysts. In: Lavens, P. and Sorgeloos, P. (eds.), *Manual on the production and use of live food for aquaculture*. FAO Fisheries Technical Paper № 361, 102–123.
- Sánchez, M.I., Paredes, I., Lebouvier, M., Green, A.J., 2016. Functional role of native and invasive filter-feeders, and the effect of parasites: Learning from hypersaline ecosystems. *PLoS ONE* **11** (8), e0161478. <https://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0161478>
- Shadkam, S., Ludwig, F., van Vliet, T.H., Pastor, A., Kabat, P., 2016. Preserving the world second largest hypersaline lake under future irrigation and climate change. *Sciences of the Total Environment* **559**, 317–325. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.190>
- Sugumar, V., 2012. Biometrical, morphological and biochemical characterization of three *Artemia* (Crustacea: Anostraca) populations from South India. *International Journal of Artemia Biology* **2** (2), 7–29.
- Sura, S.A., Belovsky, G.E., 2016. Impacts of harvesting of brine shrimp (*Artemia franciscana*) in Great Salt Lake, Utah, USA. *Ecological Applications* **26** (7), 407–414.
- Wooldridge, T.H., Adams, J.B., Fernandes, M., 2016. Biotic responses to extreme hypersalinity in an arid zone estuary. *South African Journal of Botany* **107**, 160–169. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.05.004>
- Xin, N., 2004. Strain characterization of *Artemia* from 9 inland salt lakes of China. *Articles and abstracts of Iran International Workshop on Artemia, 21–25 September, Urmia*. Urmia, Iran, 75–76.

# Influence of hydrometeorological factors on the ecological state of the hypersaline lake Saki (Crimea) in 2017–2018

Irina I. Rudneva<sup>1\*</sup>, Viktor V. Chaban<sup>2</sup>, Miroslava A. Golub<sup>2</sup>,  
Valentin G. Shaida<sup>1</sup>, Anton V. Shcerba<sup>1</sup>

<sup>1</sup> A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas (IBSS), Russian Academy of Sciences, pr. Nakhimova 2, Sevastopol, 299011

<sup>2</sup> Crimean Hydrogeological Regime and Operation Station, ul. Kurortnaya 4, Saki, 296500 Republic of Crimea

\*svg-41@mail.ru

In order to identify the influence of hydrometeorological conditions on the seasonal changes in the ecological state of the salt Lake Saki (Crimea), the dynamics of hydrochemical parameters of water (salinity, oxygen content, temperature, pH, Eh) and changes in the population of the brine shrimp *Artemia salina* L., as well as the proportion of hatching nauplii from cysts were studied in 2017 and 2018. A decrease in oxygen content and an increase in brine salinity in the summer were accompanied by an increase in air temperature and water temperature; the interannual differences of these parameters were preconditioned by the hydrometeorological peculiarities. *Artemia* cysts were found in the water column throughout the year; the nauplii appeared in February – March; the maximum abundance of all life stages of brine shrimp was noted in May. The proportion of hatching nauplii from cysts collected in the cold season was significantly higher than that in the warm season. The observed patterns are discussed as a possible source for analyzing the transformation of hyperhaline ecosystems within the ongoing climate change and for developing the guidelines for the optimal commercial use of the mineral and biological resources of such ecosystems.

**Keywords:** seasonal changes, hydrochemical indicators, *Artemia*, salinity, oxygen content, temperature, pH, Eh.