

УДК 628.19(285.32)(477.75)

**АНТРОПОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ОЗЕРА КЫЗЫЛ-ЯР (КРЫМ):
РЕЗУЛЬТАТЫ МНОГОЛЕТНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ (1985-2017 гг.)¹**

© 2018 г. Н.В. Шадрин*, В.Г. Симонов**, Е.В. Ануфриева*, В.Н. Поповичев*, Н.О. Сиротина**

*Институт морских биологических исследований им. А.О. Ковалевского РАН
Россия, 299011, г. Севастополь, просп. Нахимова, д. 2. E-mail: lena_anufrieva@mail.ru

**Крымская гидрогеологическая режимно-эксплуатационная станция
Россия, 296500, г. Саки, ул. Курортная, д. 4

Поступила в редакцию 10.09.2017

В аридной части Крыма находится множество гиперсоленых озер, некоторые из них в настоящее время претерпевают антропогенные трансформации. Рассмотрено влияние созданного водохранилища на озеро морского происхождения Кызыл-Яр (западный Крым). В результате просачивания воды из водохранилища соленость в озере уменьшилась с 162 г/л в 1985 году до 2-3 г/л в 2005 году с последующей ее стабилизацией на этом уровне. За 20 лет озеро из гиперсоленого превратилось в пресноводное. Изменилось соотношение концентрации ионов в воде и иловых водах, показатели Ca^{2+}/Na^{+} и SO_4^{2-}/Cl^{-} увеличились. Произошли существенные перемены в структуре биологического разнообразия и характере донных отложений, после распреснения в озере перестали встречаться жаброногие рачки рода *Artemia*, которые до этого были фактически единственными представителями местной фауны, в планктоне стали доминировать *Cladocera* и *Cyclopoida*.

Ключевые слова: Крымский полуостров, антропогенная трансформация, долговременные изменения, озерные экосистемы.

DOI: 10.24411/1993-3916-2018-00039

Во всем мире наблюдается увеличение скорости изменения озерных экосистем вследствие климатических флуктуаций и антропогенной деятельности, что происходит не только из-за непосредственных воздействий на озера, но и через сложную систему ландшафтных связей (Моисеенко, Гашкина, 2010; Verschuren et al., 2002; Martin, Soranno, 2006; Johnson, Host, 2010; Shimoda et al., 2011; Shadrin, Anufrieva, 2013; El-Shabrawy et al., 2015). Понимание этих связей требует анализа изменений конкретных озер. В аридных и субаридных регионах процесс осолонения водоемов является одной из общих тенденций изменения многих озер в мире (Плотников, 2016; Williams, 2001; Hart et al., 2003; Delju et al., 2013; El-Shabrawy et al., 2015), в то время как примеров их распреснения намного меньше (Бондаренко, Яковенко, 2000; Shadrin, Anufrieva, 2013; Anufrieva et al., 2014; El-Shabrawy et al., 2015).

Крым, за исключением горной части, является аридной зоной, радиационный индекс сухости ($K=B/LP$, где B – годовой радиационный баланс, L – суммарная сумма осадков и P – скрытая теплота парообразования) превышает условную границу сухости климата $K=3$. Это и обуславливает постепенное накопление солей в водоемах и наличие большого количества гиперсоленых озер в аридной части полуострова (Shadrin, 2017). В результате реализации гидротехнических проектов в Крыму произошло распреснение озер Донузлав, Панское и других, которые ранее были гиперсолеными (Shadrin et al., 2012). Строительство Северо-Крымского канала также стало причиной уменьшения солености в некоторых водоемах полуострова. С началом его работы в 1967 году воды реки Днепр стали поступать в Крым и использоваться для полива сельхозугодий, с последующим сбросом их с полей в некоторые озера и залив Азовского моря Сиваш. Произошла трансформация залива из гиперсоленого в солоноватоводный. В настоящее время в результате прекращения подачи воды в канал он снова стал гиперсоленым водоемом (Шадрин и др., 2016). Просачивание воды из канала привело к распреснению некоторых гиперсоленых водоемов с кардинальным изменением в

¹ Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 16-05-00134 А.

них биоты (Бондаренко, Яковенко, 2000; Anufrieva et al., 2014).

Крымское озеро морского происхождения Кызыл-Яр может служить одним из наиболее ярких примеров unplanned и непредвиденного распреснения через систему ландшафтных связей, за 20-25 лет оно превратилось из гиперсоленого в пресноводное (Shadrin et al., 2012). Причиной этого стало создание Межгорного водохранилища ($45^{\circ} 03' 30''$ с.ш., $33^{\circ} 47' 12''$ в.д.), расположенного в Таксабинской балке, в 1981-1991 годах продолжалось его строительство и наполнение водами Северо-Крымского канала. Уровень воды в водохранилище поддерживался земляной плотиной длиной 1776 м. При максимальной глубине в водохранилище 37.5 м и площади полного водного зеркала 4 км^2 его объем составлял 50 млн. м^3 (до апреля 2014 года, когда была прекращена подача днепровской воды в Северо-Крымский канал). Вскоре после пуска водохранилища в эксплуатацию около 2.25 м^2 земель подверглись заболачиванию. За счет фильтрационных потерь из Межгорного водохранилища несколько позже по тальвегу балки Тобе-Чокрак образовался постоянный водоток, его воды стали поступать в озеро Кызыл-Яр. По данным исследований Межгорного гидроузла, потери на фильтрацию из водохранилища в 1992 году составили 18.9 млн. м^3 , то есть 24% от годового объема водоподачи по Сакской ветке Северо-Крымского канала. С 1984 года начали отмечаться изменения в озере Кызыл-Яр, которые отслеживались в 1985-2009 годы сотрудниками Крымской гидрогеологической режимно-эксплуатационной станции г. Саки (результаты многолетних исследований отражены в неопубликованных отчетах и учтены в данном исследовании), а в 2010-2017 гг. – сотрудниками Института морских биологических исследований им. А.О. Ковалевского РАН г. Севастополь. Цель статьи – суммируя результаты всех исследований, проанализировать основные изменения, которые произошли в озере Кызыл-Яр в период с 1985 по 2017 гг.

Материалы и методы

Район исследований. Озеро Кызыл-Яр расположено в западном Крыму ($45^{\circ} 03' 48''$ с.ш., $33^{\circ} 37' 24''$ в.д.) и входит в Евпаторийскую группу соленых озер. Оно вытянуто с запада на восток и перпендикулярно берегу Черного моря. Далее приведены характеристики озера до начала поступления в него пресной воды из Межгорного водохранилища (Курнаков и др., 1936; Понизовский, 1965). По состоянию на 1930-1960 годы площадь озера составляла $6.8-7.0 \text{ км}^2$, наибольшая глубина не превышала 0.1-0.2 м. По генезису озеро Кызыл-Яр – затопленная морем балка, отделенная от моря песчано-гравийной с примесью битой ракушки пересыпью, ширина которой составляла от 170 до 380 м. Уровень воды в озере был ниже уровня моря на 0.6-0.8 м. Питание озера происходило за счет фильтрации морской воды и ее поступления через пересыпь во время сильных штормов (до 8-10%), подземные воды и поверхностный сток составляли 40-60% общего притока воды, атмосферные осадки – 35-45%. Объем рапы составлял примерно 1.7-2.0 млн. м^3 . Соленость воды колебалась в пределах 140-300 г/л. В озере преобладали серые и темно-серые, местами черные мощные иловые отложения толщиной до 12-14 м. В восточном конце озера в плавнях находилось несколько родников. К концу лета озеро сильно высыхало и рапа перегонялась ветром от одного берега к другому. В августе обычно наблюдалась садка поваренной соли, толщина слоя которой составляла 2-3 см. Бурение не показало наличие слоя донной соли. Илы озера осуществляли обменную адсорбцию ионов из раствора, в результате чего поступающие воды метаморфизировались. Среди животных массово отмечены лишь представители рода *Artemia* spp., другие виды появлялись эпизодически – весной и в местах выхода грунтовых вод.

Отбор и обработка проб. Комплексные исследования озера Кызыл-Яр были проведены в период с 1985 по 2017 гг. Они включали топосъемку, приборные и визуальные наблюдения озера, взятие проб воды, донных отложений, планктона и бентоса, визуальные орнитологические наблюдения, опрос местного населения. В 1985-2009 гг. исследования проводились сотрудниками Крымской гидрогеологической режимно-эксплуатационной станции на семи станциях (рис. 1), а в 2010-2017 гг. – сотрудниками Института морских биологических исследований им. А.О. Ковалевского на двух станциях (рис. 1). Координаты станций определяли с помощью GPS-навигатора Garmin GPS 72B. Для характеристики изменений озера кроме собственных данных использовали многолетние спутниковые наблюдения (1985-2017 гг.), имеющиеся в открытом доступе на сайте Геологической службы США (U.S. Geological Survey).

В 1985-2009 гг. было собрано 67 проб воды для проведения физико-химических анализов, объем

каждой пробы составил 5-10 л. Соленость измеряли ручным рефрактометром Kellong WZ212, температуру и pH – электронным термометром и pH метром PHN-830. В 1985-2005 гг. было взято 28 проб донных отложений. Керны длиной 0.5 м отбирали с помощью титанового цилиндрического бура диаметром 0.05 м с поворотным механизмом, позволяющим извлекать вертикальный керн донного ила в естественном виде. Физико-химический анализ воды и донных отложений проводили по стандартным методикам (Бахман и др., 1965; Лурье, 1973) на своевременно поверенном и сертифицированном оборудовании.

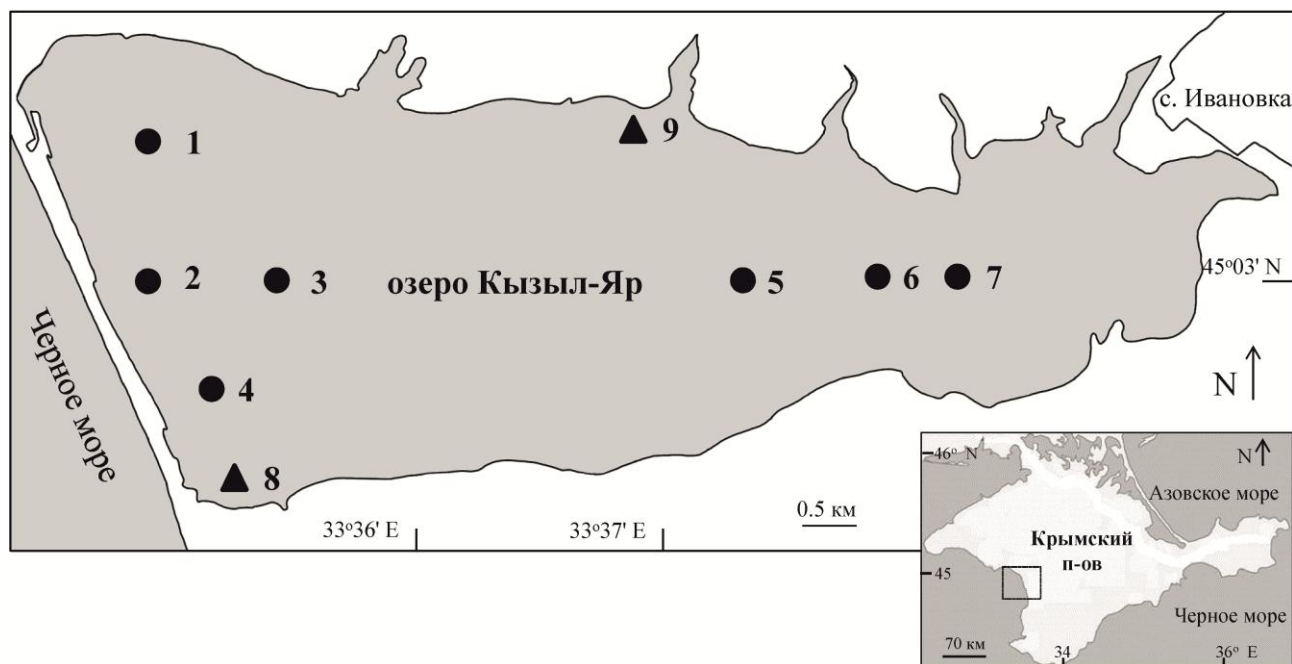


Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб в озере Кызыл-Яр. Условные обозначения: станции 1-7 – 1985-2009 гг., станции 8-9 – 2010-2016 гг.

В 1992-1994 гг. было собрано по 12 количественных проб фитопланктона и зоопланктона (в разные сезоны на 5-7 станциях) и 9 проб бентоса. В 2010-2017 гг. взято 4 количественные пробы фитопланктона, 15 проб зоопланктона (в разные сезоны на 2-3 станциях) и 3 качественные пробы бентоса. Количественные пробы зоопланктона отбирали путем фильтрации 50-100 л воды через планктонную сеть с размером ячеек 110 мкм, для определения фитопланктона отбирали 1.5 л воды. Пробы бентоса отбирали с помощью трубчатого штангового дночерпателя диаметром 0.008 м. Сбор подводной растительности проводили с использованием якорька-кошки или сачка. Пробы фиксировали 4% формалином и обрабатывали под биноклем МБС-9 и микроскопом Olympus VX50. Биомассу фитопланктона определяли исходя из его размерной структуры (Зотов, 2005), первичную продукцию – радиоуглеродным методом (Сорокин, 1987).

Анализ данных. Данные были подвергнуты стандартной статистической обработке, рассчитывали средние значения параметров и их коэффициенты вариации (CV). Достоверность различий средних значений определяли по *t*-критерию Стьюдента для $p=0.01$. Параметры регрессионных уравнений рассчитывали в MS Excel. Вид аппроксимирующей функции выбирали, исходя из числа возможных, по максимальным значениям коэффициента детерминации (R^2). Коэффициент корреляции Пирсона (r), как более адекватный для нашего случая, определяли извлечением корня квадратного из R^2 для выбранного вида функции, рассчитанного в MS Excel. Уровни значимости коэффициентов корреляции (p) определяли, сравнивая полученные значения с критическими по (Müller et al., 1979).

Результаты

С момента ввода в строй Межгорного водохранилища площадь озера существенно увеличилась, в среднем на 30-45%, что следует из результатов наземной топографической съемки и временной

серии космических снимков (U.S. Geological Survey, 2017). В сентябре 1992 г. озеро уже занимало площадь 10.5 км², ширина морской пересыпи уменьшилась до 50-80 м, глубина составляла 1.5-1.8 м. Уровень воды повысился в 4 раза и стал выше уровня моря на 0.9-1.0 м. В результате этого морская вода практически перестала поступать в озеро, начался сток пресной воды из озера в море. Увеличения солености в озере у пересыпи в 1993-2017 гг. не наблюдали, это также говорит о том, что поступление морской воды в водоем за счет фильтрации через пересыпь в 1993-2017 гг. отсутствовало. Визуальные наблюдения показали, что общее повышение уровня воды обусловило начало интенсивной абразии южных берегов, по берегам озера стало развиваться поливное земледелие.

Средняя концентрация солей в воде озера к сентябрю 1992 г. снизилась со 168 г/л (CV=0.05) в мае 1985 г. до 55 г/л (CV=0.03). В марте 1994 г. соленость была 7.8 г/л (CV=0.02), в сентябре 1994 г. – 18.7 г/л (CV=0.04). Уменьшение солености продолжалось, в сентябре 1998 г. она составляла 5.1 г/л (CV=0.05), к концу мая 2005 г. – 2.7 г/л (CV=0.02), а в октябре-ноябре 2009 г. – 3.2 г/л (CV=0.03). Позднее соленость стабилизировалась, и в 2010-2013 г. не отмечали соленость выше 2-2.5 г/л (CV=0.05). После прекращения подачи воды в Северо-Крымский канал в мае-октябре 2014 г. соленость в озере была 2-3 г/л (CV=0.05), в августе 2015 г. – 2-4 г/л (CV=0.03), в конце мая 2016 г. – 2.5-3.7 г/л (CV=0.02), в сентябре 2016 г. – 3.1-4.0 г/л (CV=0.05), в апреле 2017 г. – 1-2 г/л (CV=0.01), в июле 2017 г. – 2-3.5 г/л (CV=0.01).

Изменение солености воды в период функционирования канала с 1985 по 2013 гг. (рис. 2) может быть описано экспоненциальной функцией ($r=0.94$, $p=0.001$). Стабилизация солености на уровне 2.0 г/л произошла примерно через 20-25 лет после начала поступления в озеро пресной воды из водохранилища. Изменился состав растворенных солей. Среди катионов увеличивалась концентрация кальция (рис. 3а), увеличение концентрации ионов магния менее выражено (рис. 3в), уменьшалась концентрация натрия (рис. 3б). Соотношение концентраций Ca^{2+}/Na^{+} экспоненциально возрастало с 1985 по 2005 г. ($r=0.99$; $p=0.001$; рис. 4а). Среди анионов уменьшилась концентрация хлора (рис. 3г), но увеличилась концентрация сульфатов (рис. 3д) и HCO_3^- (рис. 3е). Соотношение концентраций SO_4^{2-}/Cl^- экспоненциально возрастало с 1985 по 2005 г. ($r=0.99$; $p=0.0001$; рис. 4б).

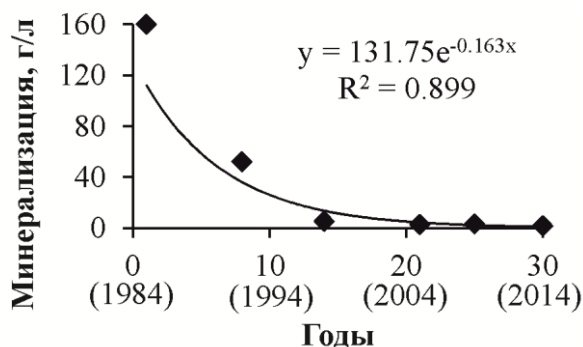


Рис. 2. Изменение солености в озере Кызыл-Яр с 1985 по 2013 гг.

Проведенные в 1992 г. исследования показали, что внешние признаки донных отложений изменились по сравнению с 1985 г., когда они имели блестящий темно-серый цвет, песчанистую текстуру с сильным запахом сероводорода. В 2005 г. цвет донных отложений был светло-серым, текстура мягкой и однородной, с запахом сероводорода. По данным 1992 г. общая минерализация воды в донных отложениях снизилась с 293 г/л (в 1985 г.) до 77 г/л. В 1992 г. в илах на глубине 0.5 м от поверхности дна отмечалось относительное снижение минерализации на 20-30 г/л по сравнению с 1985 г. Соотношение ионов в отжиме грязи до глубины грунта 0.4 м имело те же значения, что и в придонной воде. В более глубоких нижних слоях донных отложений сохранялось прежнее соотношение ионов, но опреснение илов сказалось на их физико-химических показателях: снизились значения объемного веса (с 1.52 г/см³ в 1985 г. до 1.37 г/см³ в 2005 г.), сопротивление сдвигу увеличилось (с 2.06 Н/м в 1985 г. до 5.52 Н/м в 2005 г.), изменилось соотношение разных форм железа, увеличилась доля сульфидов железа (с 0.2% в 1985 г. до 20% в 2005 г.). Исследования донных отложений озера Кызыл-Яр в 1993 г. показали дальнейшее распределение верхнего слоя.

Минерализация верхнего слоя (0-20 см) снизилась с 77 г/л (1992 г.) еще на 10-15 г/л, минерализация в 40-60 см слое снизилась на 5-10 г/л. В 2009 г. общая минерализация грязевого раствора (отжима) в 0-25 см слое составляла в среднем 18.8 г/л ($CV=0.11$). Временные изменения солёности иловых вод в период 1985-2009 гг. (рис. 5) можно описать экспоненциальным уравнением ($r=0.97$, $p=0.001$). Сравнивая рисунки 2 и 5, видим, что скорость уменьшения солёности в водной толще была почти на 40% выше, чем в иловом растворе. Оценка концентрации биогенов и первичной продукции была проведена только в 2014-2016 гг. (табл. 1), по этим показателям озеро в настоящее время является мезотрофным или слабо-эвтрофным.

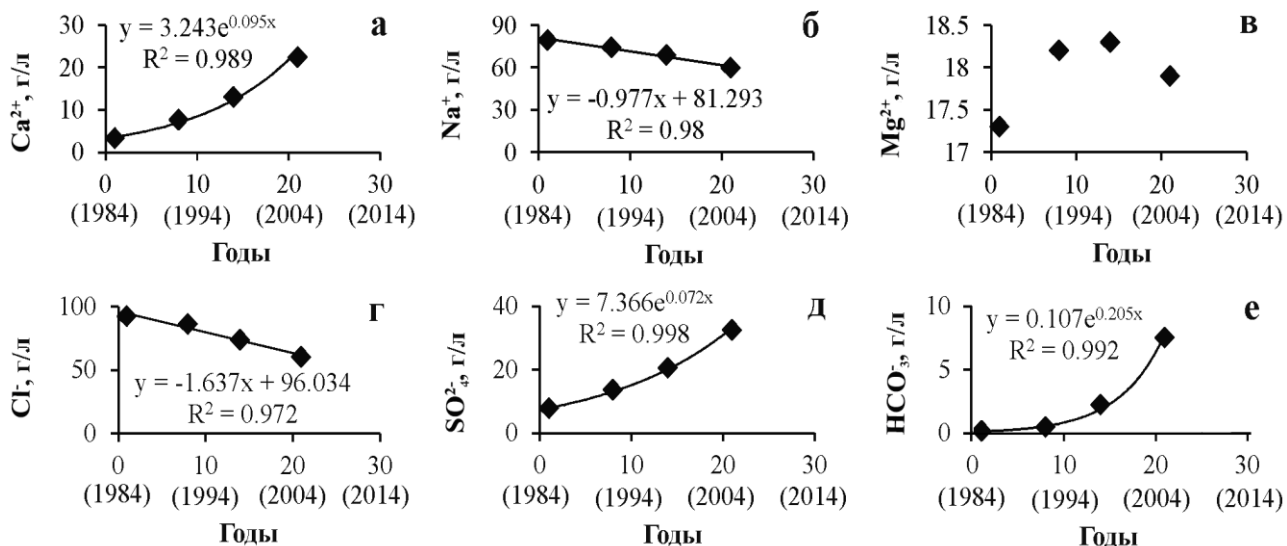


Рис. 3. Изменение концентрации Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- в 1985-2005 гг.

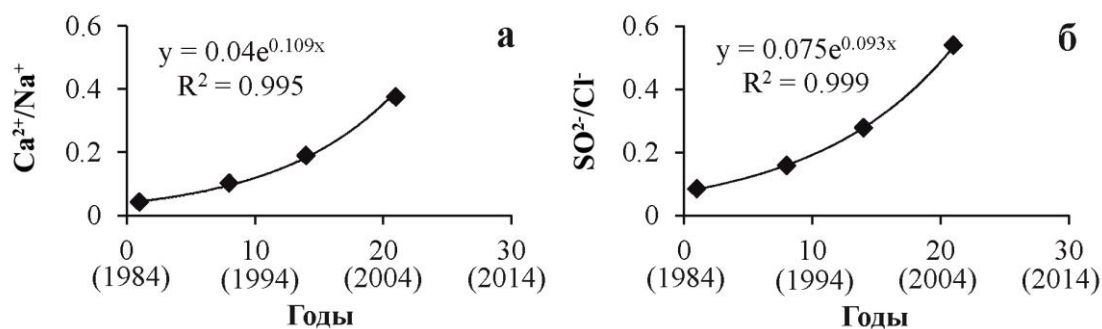


Рис. 4. Изменение отношения концентраций Ca^{2+}/Na^+ (а) и SO_4^{2-}/Cl^- (б) в оз. Кызыл-Яр в 1985-2005 гг.

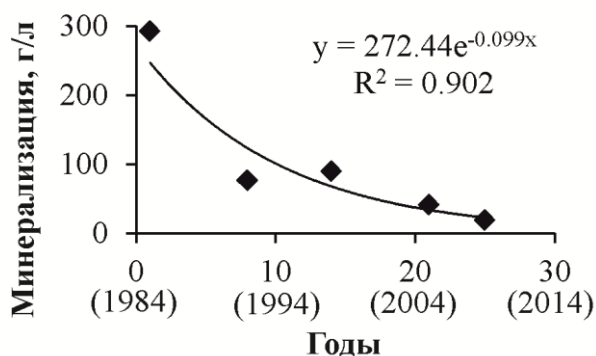


Рис. 5. Изменение солёности иловых вод в озере Кызыл-яр с 1985 по 2009 гг.

За период исследования в озере произошли существенные изменения биоты. Работы, проведенные в июне 1992 г. и июле 1993 г., показали, что средняя биомасса фитопланктона составляла 0.66 мг/л, подобные биомассы характерны для мезотрофных-эвтрофных озер. Суммарная биомасса зоопланктона в среднем по озеру составила 0.610 г/м³, перестали встречаться жаброногие рачки рода *Artemia*, которые до начала распреснения были фактически единственными представителями фауны в озере. В планктоне стали доминировать ветвистоусые рачки *Moina salina* (Daday, 1888) и амфипода *Gammarus aequicauda* (Martynov, 1931). Массовое развитие получили зеленые нитчатые водоросли *Cladophora* spp., которые ранее здесь не были отмечены. В формируемых кладофорой матах были обнаружены представители *Harpacticoida*, *Gammaridae*, *Ostracoda*, *Nematoda*, личинки *Coleoptera* и *Diptera*. В бентосе наиболее многочисленными были личинки *Chironomidae*, в июле 1993 г. в среднем по озеру их биомасса составила 69.006 г/м². Визуально отмечалось значительное расширение площади зарослей тростника, которые стали проникать и в те участки побережья, где их ранее не было. Начиная с 1993-1994 гг., местными рыбаками было отмечено повсеместное заселение озера мелкой пресноводной рыбой (карась, окунь, бычок, плотва), которое происходило без участия людей. В 1997-2005 гг. в озеро направленно вселили карпа, толстолобика, белого амура, к 2009 г. сформировались их многовозрастные популяции. Начиная с 2000-2005 гг. в прибрежной зоне озера, где образовались мощные заросли тростника, наиболее широкие в северной части, появились места стабильного гнездования и зимовки диких водоплавающих птиц (лебеди, утки, кулики и др.).

Таблица 1. Концентрация биогенов и первичная продукция в воде озера Кызыл-Яр.

| Дата | NO ₂ | NO ₃ | NH ₄ | N _{орг.} | PO ₄ | P _{орг.} | Si | pH | ПП* | C _{взв.**} |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|------|-----|----------------------------|---------------------|
| | мкг/л | | | | | | | | мгС/м ³ в сутки | мг (сух)/л |
| 13.05.2014 | 7.4 | 5.2 | 27.8 | 1172 | 28.0 | 15.4 | 2237 | 7.8 | 452.6 | 17.1 |
| 18.11.2014 | 2.4 | 17.9 | 76.7 | 1062 | 20.7 | 53.0 | 5146 | 8.1 | 283.0 | 20.0 |
| 18.05.2016 | 4.8 | 418.1 | 73.8 | 768 | 2.5 | 45.8 | 2256 | 8.0 | 286.9 | 14.0 |
| 07.09.2016 | 4.7 | 111.6 | 19.3 | 2720 | 89.3 | 14.0 | 7686 | 8.7 | 649.0 | 20.0 |

Примечания к таблице 1: ПП* – первичная продукция, C_{взв.**} – взвешенное органическое вещество (сухая масса).

Проведенные в 2016 г. исследования показали, что в озере происходит массовое развитие микроводорослей (табл. 2), доминирующими являются *Bacillariophyta* и *Cyanobacteria*. Суммарная биомасса фитопланктона (0.3-0.8 мг/л) не отличалась от таковой в 1992-1993 гг. (0.66 мг/л), из чего можно сделать вывод, что существенных изменений трофности озера за период с 1992 г. по 2017 г. не произошло. Зоопланктон в 2010-2017 гг. характеризовался высокой численностью (3000-8000 экз./м³), доминировали *Cladocera* и *Cyclopoida*, также встречались *Rotifera*, личинки *Chironomidae*, *Coleoptera*, амфипода *G. aequicauda* и креветки. В мае 2016 г. суммарная численность зоопланктона достигала 7400 экз./м³, основу общей численности составляли *Cyclopoida* – 96%, вторыми были *Cladocera* – 4%. В апреле 2017 г. общая численность зоопланктона составляла 5850 экз./м³, доминировали *Cladocera* (64%) и *Cyclopoida* (30%), в июне 2017 г. общая численность зоопланктона достигала 360 экз./м³, *Cyclopoida* – 50%, *Cladocera* – 48%. Существенных изменений в составе бентоса с 1992 г. не произошло, основные представители – *Harpacticoida*, *Gammaridae*, *Ostracoda*, *Nematoda*, личинки *Coleoptera* и *Diptera*.

Таблица 2. Структура фитопланктона в озере Кызыл-Яр в 2016 г.

| Дата | Общая численность клеток, 10 ³ кл/л | Численность <i>Bacillariophyta</i> , 10 ³ кл/л | Численность <i>Cyanobacteria</i> , 10 ³ кл/л | Общая биомасса, мг/л |
|------------|--|---|---|----------------------|
| 18.05.2016 | 800 | 410 | 250 | 0.80 |
| 07.09.2016 | 280 | 100 | 160 | 0.28 |

До создания водохранилища, когда озеро было гиперсоленным, подводной многоклеточной растительности в нем не отмечали. В 1992-1994 гг. зарегистрировано массовое развитие кладофоры,

которой в 2014-2016 гг. визуально было значительно меньше. Среди подводной растительности в настоящее время доминируют рдесты, в частности, в 2016 г. массовым видом был *Potamogeton crispus* L. (1753), широко распространенный в Евразии и Северной Америке, но довольно редкий в Крыму (встречался только в пресных водоемах предгорий и Ай-Петринской яйлы).

Обсуждение

Потери воды из созданного Межгорного водохранилища привели к переходу озера Кызыл-Яр из гиперсоленого состояния в практически пресноводное – с соленостью около 2 г/л. Переход осуществлялся на протяжении 20-25 лет, при этом уменьшение минерализации водной толщи происходило быстрее, чем иловых вод. Постоянный приток пресной воды в озеро сделал его фактически проточным водоемом. При этом процесс распреснения глубоких горизонтов донных отложений еще не завершился. Этим и объясняется незначительная, но постоянно регистрируемая минерализация воды до 2-3 г/л, в основном за счет хлоридов натрия и сульфатов кальция. Возникает вопрос: будет ли наблюдаться дальнейшее уменьшение солености воды в озере? В свете современной ситуации можно уверенно предположить, что этого происходить не будет. Эта уверенность базируется на том, что в связи с прекращением подачи днепровской воды в Северо-Крымский канал уровень воды в Межгорном водохранилище стал резко уменьшаться. Например, в начале июня 2015 г. в Межгорном водохранилище воды практически не осталось, однако затем дожди привели к его частичному заполнению. При дальнейшем уменьшении запасов воды в Межгорном водохранилище и уменьшении фильтрации воды из него в озеро испарение с поверхности озера начнет превышать поступление воды, что приведет к началу роста солености в озере вследствие аридности климата. Учитывая накопленный запас в грунтовых водах и плавнях, можно предположить, что в течение ряда лет этот рост будет очень медленным. Исследования, проведенные в мае и сентябре 2016 г. и апреле 2017 г. не позволяют однозначно говорить о начале роста солености. Большое количество атмосферных осадков в первой половине 2017 г. привело к тому, что уровень воды в водохранилище повысился, а соленость в озере несколько уменьшилась. Только продолжение мониторинга озера может дать более детальную информацию необходимую для количественного прогноза возможных изменений характера его обмена с морем, солености, площади и состояния экосистемы.

В озере Кызыл-Яр за период наблюдений происходило постепенное изменение ионного состава, обусловленное тем, что приток в озеро морской воды уменьшился, а пресной увеличился. Подобные изменения были отмечены и в других гиперсоленых водоемах Крыма после реализации строительных проектов, уменьшивших поступления в них морской воды. Примером этого, в частности, может служить озеро Тобечикское (Шадрин и др., 2010). Увеличение концентрации кальция и магния при распреснении соленых озер – закономерность, обнаруженная и в озерах других аридных регионов, например, в забайкальском озере Бормашево (Намсараев и др., 2007).

Экосистема озера Кызыл-Яр перешла в новое состояние, подобные переходы наблюдали и во многих других водоемах мира (Carpenter, 2003; Shadrin, Anufrieva, 2013; El-Shabrawy et al., 2015). При существенных изменениях солености в озерах всех континентов происходит кардинальное изменение структуры биоразнообразия, что показано для водоемов Африки (Carrasco, Perissinotto, 2012; El-Shabrawy et al., 2015), Америки (Wurtsbaugh, Berry, 1990), Европы (Ivanova et al., 1994) и Азии (Плотников, 2016). Структура биологического разнообразия в озере Кызыл-Яр коренным образом изменилась, в частности, исчезла популяция артемии. При уменьшении солености ниже 40-50 г/л артемии практически всегда перестают существовать в экосистемах (Бондаренко, Яковенко, 2000; Wurtsbaugh, Berry, 1990; Ivanova et al., 1994; Shadrin, Anufrieva, 2013; Shadrin et al., 2012). В гиперсоленом озере лечебные грязи образуются в результате функционирования экосистемы, как целого (Ivanova, 1994; Gheorghievici et al., 2015). Переход экосистемы озера Кызыл-Яр в новое альтернативное состояние привел к тому, что стали формироваться другие донные отложения. Найденные в 2005 г. параметры донных отложений, свидетельствуют о том, что они не соответствуют характеристикам лечебных грязей, запас которых в озере оценивался ранее в 34.3 млн. т (Курнаков и др., 1936). Можно предположить, что в настоящее время в озере также происходит трансформация ранее накопленных лечебных грязей, в результате этого их объем уменьшается. Водоем стал практически пресноводным с новыми ресурсами и новыми

возможностями их использования.

Выводы

Случай антропогенной трансформации озера Кызыл-Яр показывает, что недоучет характера ландшафтной связности может приводить к непредвиденным существенным изменениям природных водоемов, удаленных от создаваемых водохранилищ. Прогнозируя возможные изменения окружающей среды в результате тех или иных проектов, особенно в таких уязвимых ландшафтах, как аридные зоны, необходимо учитывать всю структуру ландшафтных связей и ее возможные изменения.

Дальнейшие комплексные исследования водоема будут содействовать пониманию закономерностей перехода водных экосистем из одного состояния в альтернативное, что необходимо для развития общей экологии водоемов аридных зон и прогноза возможных дальнейших изменений экосистемы озера Кызыл-Яр. Проведение комплексных исследований необходимо также для оценки продукционного потенциала экосистемы и возможностей использования ресурсов озера (биоресурсы, лечебные грязи) при организации рационального многоцелевого менеджмента водоема, что для аридного Крыма является важной задачей.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность сотрудникам Крымской гидрогеологической режимно-эксплуатационной станции и Института морских биологических исследований имени А.О. Ковалевского РАН, которые принимали участие в полевых работах и анализе проб в разные годы исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бахман В.И., Овсянникова К.А., Вадковская А.Д. 1965. Методика анализа лечебных грязей (пелоидов). М.: ЦНИИКиФ. 142 с.
- Бондаренко Л.В., Яковенко В.А. 2000. Трансформация видовой структуры ракообразных озера Мойнаки в связи с его опреснением // Вісник Дніпропетровського університету. Серія біологія, екологія. Т. 8. № 2. С. 100-105.
- Зотов А.Б. 2005. Характеристика удельной поверхности таксономических отделов фитопланктона Одесского региона (Украина) // Альгология. Т. 15. № 2. С. 195-204.
- Курнаков Н.С., Кузнецов В.Г., Дзенс-Литовский А.И., Равич М.И. 1936. Соляные озёра Крыма. М.-Л.: АН СССР. 278 с.
- Лурье Ю.Ю. 1973. Унифицированные методы анализа вод. М.: Химия. 376 с.
- Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А. 2010. Формирование химического состава вод озер в условиях изменения окружающей среды. М.: Наука. 268 с.
- Намсараев Б.Б., Зайцева С.В., Хахинов В.В., Иметхенов А.Б., Ринчино С.Х., Максанова Л.Б.-Ж. 2007. Минеральные источники и озера Баргузинской долины. Улан-Удэ: Издательство Бурятского государственного университета. 103 с.
- Плотников И.С. 2016. Многолетние изменения фауны свободноживущих водных беспозвоночных Аральского моря. С.-Пб.: ЗИН РАН. 168 с.
- Понизовский А.М. 1965. Соляные ресурсы Крыма. Симферополь: Издательство Крым. 164 с.
- Сорокин Ю.И. 1987. К оценке адекватности радиоуглеродного метода измерения первичной продукции // Океанология. Т. 27. № 4. С. 678-682.
- Шадрин Н.В., Копейка А., Батогова Е. 2010. Структура и динамика зоопланктона гиперсоленого Тобечикского озера в 2007-2009 гг. (Крым, Керченский п-ов) // Современные проблемы экологии Азовско-Черноморского района. Материалы V Международной конференции. Керчь: Изд-во ЮгНИРО. С. 50-56.
- Шадрин Н.В., Сергеева Н.Г., Латушкин А.А., Колесникова Е.А., Киприянова Л.М., Ануфриева Е.В., Чепыженко А.А. 2016. Трансформация залива Сиваш (Азовское море) в условиях роста солености: изменения мейобентоса и других компонент экосистемы (2013-2015 гг.) // Журнал Сибирского федерального университета. Серия Биология. Т. 9. № 4. С. 452-466.
- Anufrieva E., Holynska M., Shadrin N. 2014. Current invasions of Asian Cyclopid species (Copepoda: Cyclopidae) in Crimea, with taxonomical and zoogeographical remarks on the hypersaline and freshwater fauna // Annales Zoologici. Vol. 64. No. 1. P. 109-130.
- Carpenter S.R. 2003. Regime shifts in lake ecosystems: pattern and variation. Oldendorf/Luhe: International Ecology Institute. 199 p.
- Carrasco N.K., Perissinotto R. 2012. Development of a halotolerant community in the St. Lucia Estuary (South Africa) during a hypersaline phase // PloS One. Vol. 7. No. 1. P. 1-14. [http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0029927].
- Delju A.H., Ceylan A., Pigué E., Rebetz M. 2013. Observed climate variability and change in Urmia Lake Basin, Iran

- // Theoretical and Applied Climatology. Vol. 111. No. 1-2. P. 285-296.
- El-Shabrawy G.M., Anufriieva E.V., Germoush M.O., Goher M.E., Shadrin N.V.* 2015. Does salinity change determine zooplankton variability in the saline Qarun Lake (Egypt)? // Chinese Journal of Oceanology and Limnology. Vol. 33. No. 6. P. 1368-1377.
- Gheorghievici L., Gheorghievici G., Tanase I.* 2015. The phytoplankton composition features of five Romanian pelogenous ecosystems // Environmental Engineering and Management Journal. Vol. 14. No. 5. P. 975-984.
- Hart B.T., Lake P.S., Webb J.A., Grace M.R.* 2003. Ecological risk to aquatic systems from salinity increases // Australian Journal of Botany. Vol. 51. No. 6. P. 689-702.
- Ivanova M.B.* 1994. Quantitative estimation of zooplankton contribution to the processes of mud formation in hypersaline lakes in the Crimea // Russian Journal of Aquatic Ecology. Vol. 3. P. 63-74.
- Ivanova M.B., Balushkina E.V., Basova S.L.* 1994. Structural functional reorganization of ecosystem of hyperhaline lake Saki (Crimea) at increased salinity // Russian Journal of Aquatic Ecology. Vol. 3. No. 2. P. 111-126.
- Johnson L.B., Host G.E.* 2010. Recent developments in landscape approaches for the study of aquatic ecosystems // Journal of the North American Benthological Society. Vol. 29. No. 1. P. 41-66.
- Martin S.L., Soranno P.A.* 2006. Lake landscape position: relationships to hydrologic connectivity and landscape features // Limnology and Oceanography. Vol. 51. No. 2. P. 801-814.
- Müller P.H., Neuman P., Storm R.* 1979. Tafeln der mathematischen Statistik. Leipzig: VEB Fachbuchverlag. 275 p.
- Shadrin N.V.* 2017. Hypersaline lakes as polyextreme habitats for life // Introduction to salt lake sciences. Beijing: Science Press. P. 173-178.
- Shadrin N.V., Anufriieva E.V.* 2013. Climate change impact on the marine lakes and their Crustaceans: The case of marine hypersaline Lake Bakalskoye (Ukraine) // Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. Vol. 13. P. 603-611.
- Shadrin N.V., Anufriieva E.V., Galagovets E.A.* 2012. *Artemia* distribution in Ukraine and general remarks on its historical biogeography // International Journal of *Artemia* Biology. Vol. 2. No. 2. P. 30-42.
- Shimoda Y., Azim M.E., Perhar G., Ramin M., Kenney M.A., Sadraddini S., Gudimov A., George B., Arhonditsis G.B.* 2011. Our current understanding of lake ecosystem response to climate change: What have we really learned from the north temperate deep lakes? // Journal of Great Lakes Research. Vol. 37. No. 1. P. 173-193.
- U.S. Geological Survey. 2017. [Электронный ресурс <http://landsatlook.usgs.gov> (дата обращения 09.08.2017)].
- Verschuren D., Johnson T.C., Kling H.J., Edgington D.N., Leavitt P.R., Erik T., Brown E.T., Talbot M.R., Robert E., Hecky R.E.* 2002. History and timing of human impact on Lake Victoria, East Africa // Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences. V. 269. № 1488. P. 289-294.
- Williams W.D.* 2001. Anthropogenic salinisation of inland waters // Hydrobiologia. Vol. 466. No. 1. P. 329-337.
- Wurtsbaugh W.A., Berry T.S.* 1990. Cascading effects of decreased salinity on the plankton chemistry, and physics of the Great Salt Lake (Utah) // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. Vol. 47. No. 1. P. 100-109.