

**А. С. Ижицкий¹, П. О. Завьялов², А. К. Курбаниязов³,
Ф. В. Сапожников⁴, Е. В. Якушев⁵**

¹К.г.н., старший научный сотрудник

(Институт океанологии РАН им. П. П. Ширшова, Москва, Россия)

²Д.г.н., член-корреспондент, главный научный сотрудник

(Институт океанологии РАН им. П. П. Ширшова, Москва, Россия)

³К.г.н., профессор (Международный казахско-турецкий университет им. Х. А. Яссави, Туркистан;
Каспийский государственный университет технологий и инжиниринга им. Ш. Есенова, Казахстан)

⁴К.б.н., старший научный сотрудник

(Институт океанологии РАН им. П. П. Ширшова, Москва, Россия)

⁵Д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник

(Институт океанологии РАН им. П. П. Ширшова, Москва, Россия)

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ ВОДОЕМОВ АРАЛЬСКОГО МОРЯ

Аннотация. Представлены результаты совместных работ комплекса научных исследований по экосистеме Большого и Малого Арала, выполненных в рамках проекта АР05134202. Приведены результаты мониторинга изменений состояния физических, химических и биологических систем остаточных водных масс Аральского моря в период современного экологического кризиса, а также исследования механизмов их адаптации к условиям недостаточности пресноводного стока и аридизации регионального климата. На основе квазисиноптических измерений выполнен сравнительный анализ современного состояния трех остаточных водоемов Аральского моря (западный бассейн Большого моря, Малое море, озеро Туштыбас). Показано, что они характеризуются совершенно разными физико-химическими особенностями среды и биоты. Результаты численного моделирования демонстрируют изменение знака поверхностной циркуляции на противоположный при инвертировании рельефа дна относительно продольной оси бассейна. Установлено также, что круговорот в придонном слое включает в себя меньшие циклонические круговороты суббассейнового масштаба.

Ключевые слова: Аральское море, галоклин, минерализация, макрозообентос, пиноклин.

Введение. Сегодня Аральское море разделено на несколько частей и образовало систему отдельных водоемов с общим происхождением, но в значительной степени различными путями развития, в ходе которых в каждом из водоемов сформировался индивидуальный физический, химический и биологический режим. Говоря о современном состоянии и изученности вопроса, следует отметить, что данная НИР входит в программу многолетнего мониторинга состояния Аральского моря, начатую Институтом океанологии РАН и Международным казахско-турецким университетом им. Ясави ещё в 2002 г. Большинство выполненных с 2002 г. экспедиций касались в основном западного бассейна Большого Арала и не охватывали Малое Аральское море и озеро Туштыбас. Однако в связи с продолжающимися изменениями аральской экосистемы и упрочившимся отделением водоемов друг от друга география наших исследований была расширена и с 2015 г. включила в себя три основных водоема, находящихся в границах бывшего Аральского моря. Соответствующая организация наблюдений в различных частях Аральского моря в рамках одного сезона позволяет наиболее точно провести качественное и количественное сравнение между ними.

Постановка проблемы. Необходимость проведения НИР связана с тем, что физический, химический и биологический режимы Аральского моря, этого все еще крупного внутреннего водоема морского типа, потерявшего за последние полвека около 90% объема в результате совокупного действия антропогенной нагрузки и глобальных климатических изменений, находятся в процессе невиданно быстрой (по обычным геологическим меркам) и радикальной перестройки, происходящей на наших глазах. Эти процессы изучены относительно слабо. Нам представляется, что было бы непростительным оставить эти изменения без должного научного «сопровождения», документирования и исследования.

Проект направлен на комплексные исследования современного состояния физических, химических и биологических систем современного Аральского моря. Предлагаемые исследования будут

характеризоваться комплексным подходом, сочетающим натурные экспедиционные наблюдения, широкое использование данных дистанционного спутникового зондирования, численное моделирование и лабораторные анализы и эксперименты. Такого рода комплексные, междисциплинарные исследования современного Аральского моря в рамках одного проекта предпринимаются впервые, чем и определяются актуальность и новизна темы. В работе учитываются также опубликованные результаты других исследований, что обеспечивает соответствие научно-технического уровня работы мировым стандартам.

Методика исследований. С 2015 по 2017 г. в глубоководной части залива Чернышева измерения проводились на четырех станциях. На каждой станции были выполнены вертикальное STD-зондирование водной колонны от поверхности до дна, отбор проб воды с поверхности. На станции С4 проводился подробный отбор проб воды батометром Нискина с нескольких горизонтов. Кроме того, в заливе были установлены две заякоренные станции №1 на глубине 14 м (с.ш. 45°57'43,6" и в.д. 59°13'33,2") и №2 на глубине 10 м (с.ш. 45°57'57" и в.д. 59°12'52,6"). На каждой заякоренной станции от поверхности до дна с интервалом 1 м были размещены автономные датчики температуры. Помимо этого, обе станции были снабжены измерителями придонных течений SeaHorse. Подъем станций был осуществлен в середине 2016 г. Также использованы источники наших трудов и методики ученых [1-14].

Результаты исследований. Район проведения исследований располагался в северной части бывшего бассейна Аральского моря, он полностью находится на территории Республики Казахстан. Полевые работы проводились с 2015 по 2017 г. Пунктами базирования экспедиции служили город Аральск и поселок Бозой. Выезд состава экспедиции непосредственно к местам работ осуществлялся на трех автомобилях повышенной проходимости УАЗ. Прямые измерения проводились с бортов двух надувных резиновых лодок «Ротан» и «Сан-Марин». В период экспедиции исследованиями были охвачены три крупных водоема, образовавшиеся в процессе долговременного снижения уровня Аральского моря (рисунок 1).

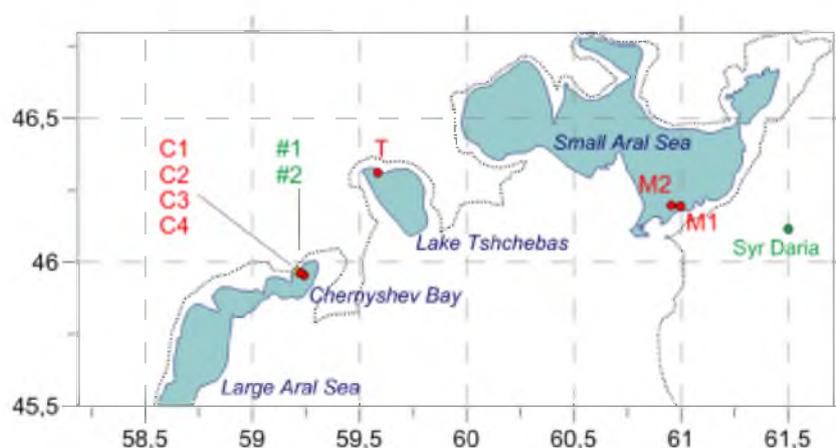


Рисунок 1 – Общая схема района работ и станций

Залив Чернышева – гипергалинный водоем в северной оконечности западного бассейна Большого Арала. У северо-западного и северного берегов залива происходит резкий свал глубин. В южной и восточной частях залива располагаются относительно мелководные участки. В центральной части залива находится вытянутая с юго-запада на северо-восток область наибольших глубин (приблизительно 14–16 м). Акватория залива отделена от основной части западного бассейна узким мелководным участком, на котором расположено подводное русло, играющее значительную роль в водообмене в придонном слое бассейна. Кроме того, в южную часть залива ранее открывался пролив, соединявший западный бассейн Большого Арала с восточным бассейном. В течение последних нескольких лет эта связь либо прекратилась полностью, либо имеет крайне редкий, эпизодический характер в связи с высыханием восточного бассейна и дальнейшим падением уровня в западном бассейне.

Озеро Тущыбас – бывший залив Аральского моря, располагавшийся в его северо-западной части. Тущыбас отделился от Большого Арала с 2005 по 2006 г. Это относительно мелководное озеро, с максимальными глубинами от 6 до 8 м. В заливе северо-восточной части озера на глубине 1 м была установлена станция с СТД-профилированием и отбором проб воды и грунта. В связи с исключительной сложностью спуска лодок и жесткими ограничениями по времени на озере Тущыбас была использована лишь одна станция.

Малое Аральское море – солоноватое озеро в северной части бывшего Аральского моря, питаемое р. Сырдария. Малый Арал был связан двумя проливами с Большим Аралом до их разъединения в 1988–1989 гг. С целью предотвращения дальнейшего высыхания Малого Арала в Казахстане в 2005 г. была построена Кокаральская плотина. Этот шаг позволил удержать сток р. Сырдария в пределах Малого Арала и поспособствовал росту уровня моря. В восточной части Малого моря в приустьевой области р. Сырдария были выполнены две станции на глубинах 2,1 и 4,6 м. На станциях проведены СТД-зондирование, отбор проб воды с поверхностного и придонного горизонтов, отбор проб на изучение зоопланктона, а также отбор донных осадков и бентосного материала.

Термохалинные параметры получены на всех станциях. Соленость определялась методом расчета сухого остатка, температура – по данным СТД-зондирования. Результаты гидрофизических измерений на станции С4 относятся к наиболее глубокой части залива Чернышева. Водная колонна оказалась стратифицирована сильнейшим образом. Слой от поверхности моря до глубины 4 м условно можно назвать верхним перемешанным с учетом наблюдавшейся там гомотермии. Ниже 4 м располагался резкий галоклин, сопровождаемый слоем температурной инверсии. Перепад солености и температуры в этом слое характеризовался экстремально высокими значениями. На промежутке глубин с 4 до 5 м температура увеличилась с 13 до 30 °С (градиент 17 °С/м). Соленость на глубине 7 м достигала 233,5 г/кг.

Таким образом, рост солености в галоклине составил более 130 г/кг. Ниже галоклина соленость увеличивалась ко дну, температура понижалась. Под галоклином, ниже слоя температурной инверсии, были зафиксированы максимальные концентрации взвешенного вещества. Кроме того, концентрация взвешенного вещества и хлорофилла у дна оказалась выше, нежели в поверхностном слое.

Наблюдаемый тип вертикальной стратификации свидетельствует о том, что залив Чернышева может выступать в роли так называемого «соляного пруда», аккумулирующего солнечную энергию за счет отсутствия конвекции водной колонны. Меромиктический характер залива также подтверждается результатами гидрохимической съемки.

Измерения температуры и солености в Малом Арале (часть акватории к северу от устья р. Сырдарии) на станциях М1 и М2 выявили полное перемешивание водной колонны от поверхности до дна в районах с глубинами, по крайней мере, до 4 м. Несмотря на однородную вертикальную структуру, наблюдаемую на обеих станциях, между ними был обнаружен значительный пространственный градиент температуры. Температура воды на профиле более мелководной станции М1 составила 8,5 °С, в то время как на станции М2 аналогичный показатель был равен 10,4 °С. Расстояние между станциями составляло 3,2 км. Кроме того, была обнаружена разница в значениях солености вод поверхностного горизонта, равная 0,3 г/кг. Замеченные различия могут быть объяснены более выраженным влиянием стока р. Сырдария в расположенном ближе к устью районе станции М2.

Согласно результатам измерений на станции Т температура воды в озере Тущыбас составила 7,4 °С, в то время как соленость достигала 75 г/кг. Для сравнения следует отметить, что по результатам измерений в октябре 2015 г. аналогичные показатели для центральной части озера Тущыбас (глубина около 4 м) составили 10 °С и 92 г/кг. По-видимому, распреснение вод в течение одного года на 17 г/кг могло произойти лишь вследствие сбросов воды с Малого Арала и её дальнейшего поступления в Тущыбас.

Изучение переходной зоны между сероводородными и кислородными водами имеет большое значение как для исследования экологического состояния Аральского моря, так и для изучения процессов формирования и эволюции анаэробных условий. Характерной чертой кислородных бассейнов является четкая взаимосвязь циклов главных биогенных элементов, так как продукционно-деструкционные процессы протекают в рамках классического уравнения Редфилда (Redfield, 1934, Иваненков, 1979), связывающего изменчивость содержания элементов стехиометрическими соотно-

шениями. В кислород-дефицитных и анаэробных условиях распад органического вещества (ОВ) выполняется в рамках разных реакций (таких, как денитрификация, сульфатредукция), и, кроме того, здесь протекают реакции взаимодействия восстановленных и окисленных форм различных элементов, осуществляющихся как химическим, так и микробиологическим путем. Так как циклы каждого элемента находятся во взаимосвязи с циклами других элементов, то в редокс-зоне нельзя рассматривать распределение какого-то элемента отдельно без анализа его взаимосвязи с другими.

С точки зрения гидрофизической структуры редокс-зона располагается непосредственно под главным пикноклином (галоклином), до глубины которого осуществляется сезонное перемешивание, приводящее к поступлению хорошо аэрированных вод, богатых кислородом. Эта зона характеризуется минимальной по глубине интенсивностью вертикального турбулентного обмена.

Выполненные в 2016 году исследования вертикальной гидрохимической структуры Аральского моря в заливе Чернышева (рисунок 2) выявили типичные для анаэробных бассейнов черты распределения. Занимавший верхние 3 м перемешанный слой отличался равномерным распределением температуры и высокими концентрациями кислорода (около 300 μM). Ниже происходило резкое увеличение температуры (от 12 до 27 $^{\circ}\text{C}$) и снижение концентрации кислорода до гипоксийных значений с последующим исчезновением. Появление сероводорода было явно замечено с горизонта 7 м. Таким образом, в слое 4–7 м присутствовал субокисный слой с отсутствием измеряемых концентраций как кислорода, так и сероводорода. В данном слое, как это происходит в других анаэробных бассейнах (Черное море, Норвежские фьорды, Готландская котловина), с глубины исчезновения кислорода увеличивалось содержание фосфатов и силикатов (до 10 и 180 μM соответственно).

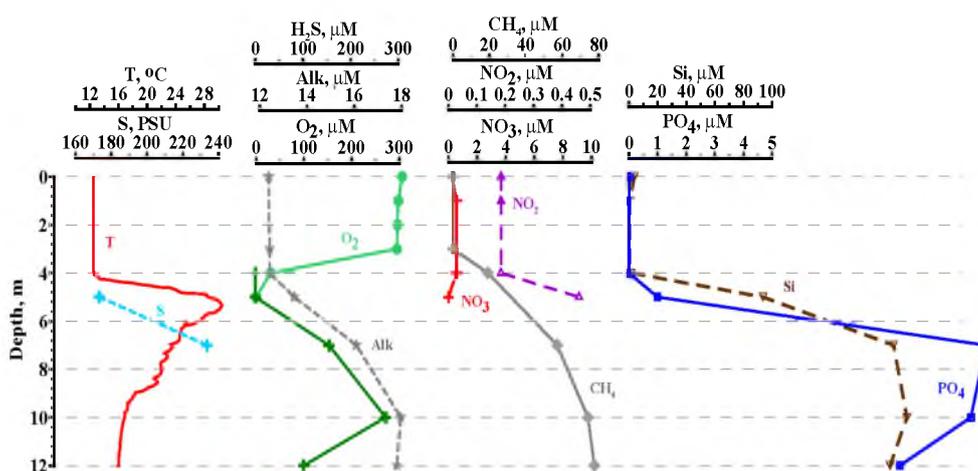


Рисунок 2 – Вертикальное распределение температуры, растворенного кислорода, нитритов, нитратов, фосфатов и силикатов на ст. С4, установленное 13.10.2015 г. в заливе Чернышева Аральского моря (предварительные данные)

Фосфаты характеризовались типичным для анаэробных бассейнов максимумом под сероводородной границей. Нитраты исчезали в кислородной зоне, на нижней границе их максимуму соответствовал максимум нитритов. В целом концентрации фосфатов, нитратов и силикатов в поверхностном слое были низкими, что может свидетельствовать об интенсивном фотосинтезе в период наблюдений. Как и в других анаэробных бассейнах, глубина появления сероводорода должна быть связана с определенной плотностью. Проведение гидрофизической съемки позволит оценить объем сероводородной зоны и площадь дна, недоступного для аэробной экосистемы. Аральское море представляет собой яркий пример экосистемы, подверженной мультистрессорному эффекту – гиперосолонения и аноксии.

Исследование состояния зообентоса водоемов системы Аральского моря. Наши исследования 2015–2017 гг. показали, что на дне Большого Арала на этом этапе жили макроскопические животные. Прогрессирующее осолонение вод и сверхнизкие температуры воды в зимний период внесли свои ощутимые коррективы в состав и структуру донного населения. Тем не менее по

результатам экспедиционных наблюдений и анализам сборов можно полагать, что на дне этого водоема продолжали обитать некоторые макроорганизмы. Сохранялись некоторые трофические связи. Вторым видом макрозообентоса, отмеченным нами в Арале на современном этапе, была хирономида *Baeotendipes noctivaga*. Этот вид является позднейшим вселенцем, проникшим в Аральское море уже на этапе глубокого переосолонения. Как показали наблюдения, личинки этого двукрылого насекомого в массе населяли поверхностный слой донных отложений Арала в конце лета и осенью. В пробах, взятых в начале апреля 2015 г. и в июне 2016 г., личинки отсутствовали, то есть начало колонизации дна этими насекомыми следует отнести на более поздние месяцы. В западном бассейне максимальные показатели обилия соответствовали глубинам около 8 м (11 360 экз/м², 32 г/м²) (рисунок 3). На 13-метровой отметке численность и биомасса *B. noctivaga* были уже существенно ниже (1950 экз/м², 5,1 г/м²). На глубине 38 м, в условиях слабого сероводородного заражения, личинки отсутствовали.

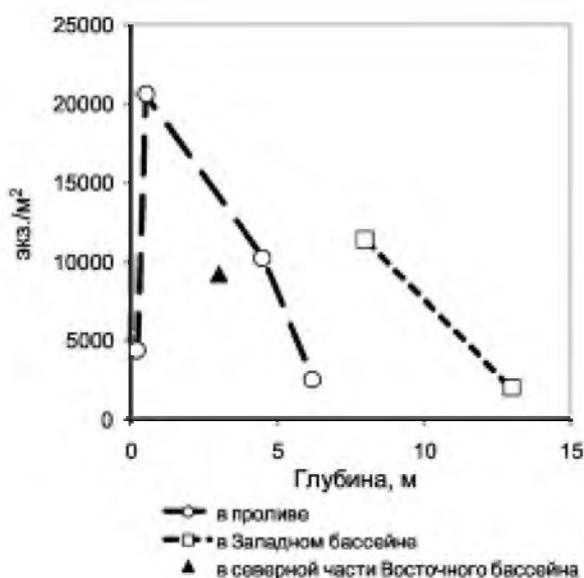


Рисунок 3 –
Распределение численности личинок хирономиды *Baeotendipes* по глубине обитания в разных районах Аральского моря в октябре 2005 года: в центральной части западного бассейна, в проливе и в северной части восточного бассейна

В проливе между западным и восточным водоемами плотность поселения личинок резко возрастала на глубинах от 0 до 0,5 м, достигая в среднем 20 580 экз/м² (при биомассе около 57 г/м²). Затем, по мере дальнейшего увеличения глубины обитания, наблюдался спад обилия – на отметке 6,2 м плотность личинок составляла всего 2500 экз/м² (при биомассе 8 г/м²). В северной части восточного бассейна, на глубине 3 м, личинки населяли поверхность грунта также довольно плотно – в среднем 9150 экз/м² (при биомассе 27 г/м²).

Мы наблюдали развитие личинок при общей солености от 85 до 114 г/кг. Это говорит о крайне высокой резистентности *B. noctivaga* в отношении роста минерализации – по крайней мере, для тех соотношений ионов, которые были отмечены в Большом Арале на изученном этапе. В июне 2015 г., когда соленость в центральной части восточного бассейна составляла 211 г/кг, мы не обнаружили там личинок. Их отсутствие нельзя было с уверенностью объяснить такой высокой минерализацией, поскольку в это время – по сезону – их не было и в Западном Арале.

В то же время отметим, что в отчленившейся от моря лагуне на восточном побережье полуострова (бывшего острова) Возрождения, где соленость в октябре 2015 г. составляла уже 163 г/кг, личинки *B. noctivaga* обнаружены не были. Возможно, их толерантный диапазон заканчивался в Большом Арале ниже этой концентрации.

Береговыми биотопами на соляной осушке залива Чернышева являются в основном Диатомовые таксоцены, превалирующие по числу видов и общему обилию компонентов микрофитобентоса во всех изученных микрофитных сообществах. Во всех точках отбора, отвечающих вариациям высокоминерализованных биотопов ручья, различающимся по степени проявления кристаллов мирабилита, мы наблюдали различные формы одного и того же таксоцена диатомей: здесь повсюду резко преобладал широко эвригалинный вид *Nitzschia communis*.

При этом на практически кристаллизованном субстрате этот вид был единственным представителем диатомей, а в составе хлопьевидных плёнок, покрывавших дно и всплывавших на поверхность воды на обводнённых участках ручья, он жил «в окружении» еще 4–5 видов, встречающихся в существенно меньших количествах: это были в порядке убывания частоты встречаемости: *Halampboranormanii*, *Amphoraspp.*1, *Naviculacryptotenella*, *Halampboracymbifera* и *Naviculaphyllepta*. По мере кристаллизации субстрата, на котором жили диатомеи, видовое богатство таксоцены снижалось.

В таксоцены мелководной лагуны за береговым песчано-соляным баром, на дне мелководных лагун, во многих местах протянувшихся за песчано-соляным баром, окаймлявшим берег, было отмечено 8 видов диатомей. Это были в порядке убывания значимости в относительном обилии: *Nitzschiacommunis*, *Halampboranormanii*, *Naviculacryptotenella*, *Navicularadiosafallax* и *Halampboraholsaticoide*, *Halampborapseudoholsatica*, *Amphorapusio* и *Nitzschiaincognita*. Если *Nitzschiacommunis* была доминантом, то *Halampboranormanii*, *Naviculacryptotenella* и *Navicularadiosafallax* можно было расценивать как массовые, *Halampboraholsaticoides* – как часто встречающийся, а оставшиеся три вида – в статусе редких.

Таким образом, в таксоцене были заполнены экологические ниши как эпипсаммических диатомей (видами *Halampboraspp.* и *Amphorapusio*, жившими на поверхности песчинок, плотно «присасываясь» к ним поверхностью створок), так и интропсаммических, живших в пространствах между песчинками и использовавших их поверхность скорее как опору при перемещении, нежели как субстрат постоянного обитания (видами *Nitzschiacommunis* и *Naviculaspp.*). Среди эпипсаммических форм отчётливо преобладала *Halampboranormanii* – широко эвригалинный вид условно пресноводного происхождения.

В прибрежных районах устья Сырдарии в Малом Арале в дночерпательных пробах было обнаружено 5 видов макрозообентосных организмов. Найдены половозрелые особи остракод, из 24 обнаруженных экземпляров 19 было полноценных самок и 5 самок с одной створкой, при этом вторая однозначно просто отпала, а у каждой из этих створок есть полноценное мягкое тело, так что это отдельные особи. Из них 2 самки были с яйцами, следовательно, в этом районе благоприятные условия для них и они там размножаются. Кроме того, было обнаружено 6 неживых остракод (раковины с остатками конечностей).

В пересчете на квадратный метр суммарная численность составляла 4141 экз./м², а биомасса – 2,247 г/м². Наибольший вклад в численность (46%) вносит полихета *Hedistediversicolor*, а в биомассу – брюхоногий моллюск *Caspihydrobiaconica* (59%). Наибольший вклад в интенсивность метаболизма сообщества (52%) вносит полихета *Hedistediversicolor*, далее следует *Caspihydrobiaconica* (38%), роль каждого из остальных видов не превышала 6,1%. Можно сделать вывод о доминировании *H. diversicolor* в исследованном районе Малого Арала.

В настоящем исследовании в отличие от предыдущих работ не было отмечено ни одного живого экземпляра двустворчатого моллюска *Abrasegmentum* – бывшего доминанта донных сообществ в период осолонения в 1980–1990-х годах [13], что может быть связано как с его отсутствием в этом районе, так и с недостаточной площадью обследованного участка дна и его низкой плотностью.

Обсуждение результатов и выводы. По итогам проведенных исследований можно сделать следующие краткие выводы:

Вывод 1. Гидрофизическая структура и стратификация отдельных остаточных водоемов современного Аральского моря существенно отличаются друг от друга. Для Большого моря и особенно залива Чернышева характерна сильнейшая стратификация. Слой от поверхности моря до глубины 4 м условно можно назвать верхним перемешанным с учетом наблюдавшейся там гомотермии. Ниже располагается резкий галоклин, сопровождаемый слоем температурной инверсии. Перепад солености и температуры в этом слое характеризовался экстремально высокими значениями. Ниже галоклина соленость увеличивалась ко дну, температура понижалась. Под галоклином, ниже слоя температурной инверсии, были зафиксированы максимальные концентрации взвешенного вещества. Кроме того, концентрация взвешенного вещества и хлорофилла у дна оказалась выше, нежели в поверхностном слое. Измерения температуры и солености в Малом Арале (часть акватории к северу от устья р. Сырдария) выявили полное перемешивание водной колонны от поверхности до дна, по

крайней мере, в районах с небольшими глубинами. Замеченные различия могут быть объяснены более выраженным влиянием стока р. Сырдария.

Вывод 2. Химический режим Арала находится в тесной взаимосвязи с его гидрофизическим состоянием. Общая масса выпавших на дно минералов – около 4,8 млрд т. С учетом того, что период высыхания моря составил к настоящему времени 50 лет, скорость соленакопления оценивается в 0,1 млрд т/год (или в среднем около 3 кг/м² в год). Были оценены массы осевших на дно минералов, млрд т: карбонат кальция – 0,07 (2%); карбонат магния – 0,1 (2%); гипс – 2,3 (49%); мирабилит – 1,9 (40%); галит – 0,4 (8%). Таким образом, садка мирабилита оказалась почти столь же массивной, сколь и садка гипса, а садка галита уже началась. Садка гипса происходит повсеместно, а садка мирабилита – зимой повсеместно, а летом только в глубокой части западного бассейна, где температура воды достаточно низкая. На мелководьях летом возможно частичное обратное растворение осажденного зимой мирабилита. Все это должно приводить к выраженному сезонному ходу ионно-солевого состава. Этот круг вопросов остается недостаточно изученным.

Вывод 3. Верхний слой донных осадков в глубокой части моря почти полностью (до 97%) состоит из мелких кристаллов мирабилита. В пробах осадков на мелководных станциях отмечено значительное (до 73%) содержание гипса. Последовательная садка карбоната кальция, карбоната магния, гипса, мирабилита и галита по мере возрастания минерализации в ходе высыхания моря привела к значительной метаморфизации ионно-солевого состава оставшейся водной массы. Так, по сравнению с условно-естественным периодом (до 1960 г.) к 2015 г. массовое сульфатно-хлоридное соотношение уменьшилось на 40%, а относительное содержание кальция снизилось в 9 раз в западном бассейне и более чем в 40 раз в восточном бассейне. Снижение содержания кальция может быть фактором, ограничивающим дальнейшую садку гипса. Прогрессирующие межгодовые изменения ионно-солевого состава прослеживаются в ежегодных наблюдениях (2002–2017 гг.). Эти тенденции характерны для обоих бассейнов Большого Арала. Уменьшение содержания кальция более ярко выражено для восточного бассейна, где соленость значительно выше и процессы метаморфизации должны проходить интенсивнее. Однако уменьшение сульфатно-хлоридного соотношения, наоборот, проявилось в восточном бассейне в меньшей степени, чем в западном. Гипотетически это можно объяснить потребляющей хлор садкой галита, происходящей более интенсивно в восточном бассейне, чем в западном. В западном бассейне моря отмечена изменчивость ионно-солевого состава вод по глубине. Поскольку глубинная водная масса западного бассейна формируется частично за счет проникающих в западный бассейн через пролив Куланды вод восточного бассейна, ее ионно-солевой состав оказывается более близким к составу последних, чем состав приповерхностных вод. Поэтому относительное содержание кальция в западной впадине, как правило, уменьшается с глубиной, а сульфатно-хлоридное соотношение, наоборот, увеличивается. Эти параметры могут считаться естественными трассерами вод, происходящих из восточного бассейна.

Вывод 4. Высыхание моря и появление плотностной стратификации привели к радикальным изменениям газового состава вод моря. В некогда полностью вентилированном кислородом море сформировались условия аноксии и сероводородного заражения придонного слоя в глубокой части акватории. Верхняя граница зоны аноксии в разные годы приходится на глубины от 12 до 39 м, а концентрации H₂S обычно варьируются между 5 и 80 мг/л. Характеристики зоны сероводородного заражения определяются гидрофизическими условиями конкретного года/сезона и обладают значительной изменчивостью.

Вывод 5. Сообщества микроэпифитов, живущие на нитчатках, сформировались вовсе не в полосе прибоя. В условиях более высокой инсоляции, большего осолонения за счёт испарения воды и разительных перепадов температуры в течение суток они неминуемо претерпели ряд структурных изменений, благодаря которым преобразовались в микрофитные ценозы нитчаткового мата на нижней границе полосы осушки. Диатомовые сообщества микрофитобентоса, изученные в прибрежной зоне Малого Аральского моря (при минерализации 9,12–9,16%), отличались наибольшим числом видов, разнообразием и сложностью организации. Тем не менее, несмотря на их локальные различия по изученным биотопам (в растительной «трусхе» среди тростников, на растениях-гидрофитах и поверхности песчаного дна), во всех ценозах преобладали сидячие формы: эпифитные для первых двух биотопов и эпиписаммические (включая колониальных) для третьего. Вклад амфороидов

на песчаном дне был существенно ниже, чем в ультрагалинных местообитаниях, а в других биотопах – и вовсе крайне незначителен. В эпифитных сообществах основные роли играли виды, ведущие неподвижный образ жизни (*Rhoicosphenis abbreviata* на останках проводящих сосудов тростника и *Synedra famelica* на вегетативных органах гидрофитов) или же малоподвижный (виды *Mastogloia* и *Rhopalodiagibba*). Полученные сведения позволяют по-новому оценить пределы галотолерантности ряда видов диатомей, а также установить биотопическую привязку ископаемых таксонов при палеоклиматических реконструкциях.

Вывод 6. Сокращение площади водоема происходит в течение года неравномерно, причем наибольшие изменения характерны для мелководной восточной части Большого моря, в Малом море они практически отсутствуют. В марте–июле площадь Большого моря испытывает небольшое увеличение с пиками в апреле (после схода снежного покрова на равнинах) и в июле (во время пика стока рек ледникового питания). Вторая половина лета и начало осени – с середины июля до октября – характеризуются резким уменьшением площади акватории. В зимнее время площадь моря, находящегося подо льдом, судя по сопоставлению осенних и весенних снимков, стабильна. Такой ступенчатый ход изменения площади моря соответствует сезонному ходу его уровня. Межгодовая изменчивость дат начала/окончания ледового сезона и его продолжительности в Малом море не обнаруживает заметного тренда в 1992–2016 гг., тогда как продолжительность ледового сезона и особенно дата исчезновения льда в мелководном Большом Арале имели ярко выраженные тренды разных знаков в разные периоды: отрицательный тренд в 1996–2002 гг. (фаза потепления) и положительный в 2002–2006 гг. (фаза похолодания).

Таковы 6 выводов из комплексного исследования гидроэкологического состояния остаточных водоемов Аральского моря, сделанные нами.

Источник финансирования исследований. Работа проведена согласно договору на выполнение НИР в рамках государственного заказа, финансируемого Министерством образования и науки Республики Казахстан, договор № 212-6 от 19 марта 2018 года по теме AP05134202 «Состояние экосистем бессточных озер аридного климата и возможности их хозяйственного использования на примере остаточных водоемов Аральского моря».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бортник В.Н., Чистяев С.П. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – Т. 7. – 196 с.
- [2] Завьялов П.О., Костяной А.Г. и др. Современное гидрофизическое и гидробиологическое состояние западной части Аральского моря // Океанология. – 2003. – Т. 43, № 2. – С. 316-319.
- [3] Завьялов О.П., Сапожников Ф.В., Ни А.А. Упешдее море // National Geographic. – 2004. – С. 32-40.
- [4] Абдуллаев У.Р., Джамалов Д.Б., Ни А.А. и др. Эволюция экологического состояния нивальной зоны Центральной Азии (на примере ледника Аксу, бассейн реки Ходжабакирган, Туркестанский хребет) // Материалы международной конференции «Геоэкология и геоэкологические проблемы горных и межгорных систем». – Ташкент, 2001. – С. 12-14.
- [5] Алекин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 444 с.
- [6] Макаров С.О. Океанографические работы. – М.: Географгиз, 1950. – 277 с.
- [7] Маккаев П.Н., Гордеев В.В., Завьялов П.О. и др. Гидрохимические наблюдения на Аральском море 2012–2013 гг. // Водные ресурсы. – 2017. – Т. 44, № 7. – С. 15-25.
- [8] Андреева С.И., Андреев Н.И. Эволюционные преобразования двустворчатых моллюсков Аральского моря в условиях экологического кризиса. – Омск: Изд-во Омского государственного педагогического университета, 2003. – 382 с.
- [9] Бортник В.И., Чистяева С.П. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР: Аральское море. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 192 с.
- [10] Аладин Н.В., Плотников И.С. Современная фауна остаточных водоемов, образовавшихся на месте бывшего Аральского моря // Труды Зоологического института РАН. – 2008. – Т. 312, № 1-2. – С. 145-154.
- [11] Andreev N.I., Andreeva S.I., Filippov A.A., & Aladin, N.V. The fauna of the Aral Sea in 1989. 1. The benthos // International Journal of Salt Lake Research. – 1992. – Vol. 1(1). – P. 103-110.
- [12] Aladin N.V., Plotnikov I.S., Potts W.T.W. The Aral Sea desiccation and possible ways of rehabilitating and conserving its Northern part // Environmetrics. – 1995. – Vol. 6. – P. 17-29
- [13] Филиппов А.А., Орлова М.И., Русакова О.М. и др. Планктон и бентос залива Большой Сарычеганак (Аральское море) // Гидробиология. – 1998. – № 4. – С. 15-32.
- [14] Плотников И.С. Изменение видового состава фауны свободноживущих Беспозвоночных (Metazoa) Аральского моря // Труды Зоологического института РАН. – 2013. – № 3. – С. 41-54.

REFERENCES

- [1] Bortnik V.N., Chistyayev S.P. Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. L.: Gidrometeoizdat, 1990. Vol. 7. 196 p. (in Russ.).
- [2] Zavyalov P.O., Kostyanov A.G. and other. Modern hydrophysical and hydrobiological state of the western part of the Aral Sea // Oceanology. 2003. Vol. 43, N 2. P. 316-319 (in Russ.).
- [3] Zavyalov O.P., Sapozhnikov F.V., Ni A.A. Gone Sea // National Geographic. 2004. P. 32-40 (in Russ.).
- [4] Abdullaev U.R., Dzhamalov D.B., Ni A.A., Petrov M.A., Tomashevskaya I.G., Tikhanovskaya A.A. The evolution of the ecological state of the nival zone of Central Asia (on the example of the Aksu glacier, the Khojabakirgan river basin, Turkestan ridge) // Materials of the international conference "Geoecology and geoecological problems of mountain and intermountain systems". Tashkent, 2001. P. 12-14 (in Russ.).
- [5] Alekin O.A. Fundamentals of hydrochemistry. L.: Gidrometeoizdat, 1970. 444 p. (in Russ.).
- [6] Makarov S.O. Oceanographic work. M.: Geografiz, 1950. 277 p. (in Russ.).
- [7] Makkaveev P.N., Gordeev V.V., Zaviyalov P.O. et al. Hydrochemical observations in the Aral Sea 2012–2013 // Water resources. 2017. Vol. 44, N 7. P. 15-25 (in Russ.).
- [8] Andreeva S.I., Andreev N.I. Evolutionary transformations of bivalve mollusks of the Aral Sea under the conditions of the ecological crisis. Omsk: Publishing House of the Omsk State Pedagogical University, 2003. 382 p. (in Russ.).
- [9] Bortnik V.I., Chistyayeva S.P. Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR: Aral Sea. L.: Hydrometeoizdat, 1990. 192 p. (in Russ.).
- [10] Aladin N.V., Plotnikov I.S. The modern fauna of the residual water bodies formed on the site of the former Aral Sea // Transactions of Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences. 2008. Vol. 312, N 1-2. P. 145-154 (in Russ.).
- [11] Andreev N.I., Andreeva S.I., Filippov A.A., & Aladin, N.V. The fauna of the Aral Sea in 1989. 1. The benthos // International Journal of Salt Lake Research. 1992. Vol. 1(1). P. 103-110.
- [12] Aladin N.V., Plotnikov I.S., Potts W.T.W. 1995. The Aral Sea desiccation and possible ways of rehabilitating and conserving its Northern part // Environmetrics. 1995. Vol. 6. P. 17-29.
- [13] Filippov A.A., Orlova M.I., Rusakova O.M. et al. Plankton and benthos of the Bolshoi Sarycheganak Bay (Aral Sea) // Hydrobiology. 1998. N 4. P. 15-32 (in Russ.).
- [14] Plotnikov I.S. Changes in the species composition of the fauna of free-living invertebrates (Metazoa) of the Aral Sea // Transactions of Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences. 2013. N 3. P. 41-54 (in Russ.).

**А. С. Ижицкий¹, П. О. Завьялов², А. К. Курбаниязов³,
Ф. В. Сапожников⁴, Е. В. Якушев⁵**

¹Г.ғ.к., аға ғылыми қызметкер (П. П. Ширшов атындағы РҒА Мұхитар институты, Мәскеу, Ресей)

²Г.ғ.д., корр.-мүше, бас ғылыми қызметкер (П. П. Ширшов атындағы РҒА Мұхита институты, Мәскеу, Ресей)

³Г.ғ.к., профессор (Қ.А.Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан, Қазақстан;
Ш.Есенов атындағы Каспий мемлекеттік технологиялар және инжиниринг университеті, Ақтау, Қазақстан)

⁴Б.ғ.к., аға ғылыми қызметкер (П. П. Ширшов атындағы РҒА Мұхитар институты, Мәскеу, Ресей)

⁵PhD доктор, жетекші ғылыми қызметкер (П. П. Ширшов атындағы РҒА Мұхитар институты, Мәскеу, Ресей)

**АРАЛ ТЕҢІЗІНІҢ ҚАЛДЫҚ СУ ҚОЙМАЛАРЫНЫҢ
ГИДРОЭКОЛОГИЯЛЫҚ ЖАҒДАЙЫН КЕШЕНДІ ЗЕРТЕУЛЕР**

Аннотация. Мақалада үлкен және Кіші Арал экожүйесі бойынша ғылыми зерттеулер кешенінің бірлескен зерттеу жұмыстарының нәтижелері берілген. Бұл жұмыстар АР05134202 жобасы аясында орындалған. Қазіргі заманғы экологиялық дағдарыс кезеңінде Арал теңізінің қалдық су массаларының физикалық, химиялық және биологиялық жүйелерінің жай-күйінің өзгерістеріне мониторинг жүргізу, сондай-ақ олардың тұщы су ағынының жеткіліксіздігі жағдайларына бейімделу және өңірлік климаттың аридизациясы механизмдерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Квасисиноптикалық өлшемдер негізінде Арал теңізінің үш қалдық су айдындарының (үлкен теңіздің батыс бассейні, Кіші теңіз, Тушыбас көлі) қазіргі жай-күйіне салыстырмалы талдау жүргізілді. Олар қоршаған орта мен биотаның физика-химиялық ерекшеліктерімен сипатталады. Сандық үлгілеу нәтижелері бассейнінің бойлық осіне қатысты теңіз түбінің рельефін инвертирлеу кезінде қарама-қарсы беттік циркуляция белгісінің өзгеруін көрсетеді. Сондай-ақ, теңіз түбі маңының айналымы суб-бассейндік масштабтағы кіші циклондық айналымдарды бірігу арқылы жүретіндігі анықталды.

Түйін сөздер: Арал теңізі, фалоклин, минералдану, макрозообентос, пиноклин.

**A. S. Izhitsky¹, P.O. Zavyalov², A. K. Kurbaniyazov³,
F. V. Sapozhnikov⁴, E. V. Yakushev⁵**

¹K.g.n., senior researcher (Institute of Oceanology RAS named after P. P. Shirshov, Moscow, Russia)

²D.g.n., Corresponding Member, Principal Researcher

(Institute of Oceanology RAS named after P. P. Shirshov, Moscow, Russia)

³K.gh., professor (International Kazakh-Turkish University H. A. Yassavi, Turkistan;

Caspian State University of Technology and Engineering named after Sh. Esenova, Kazakhstan)

⁴Kb.b., Senior Researcher (Institute of Oceanology RAS named after P. P. Shirshov, Moscow, Russia)

⁵Ph.D doctor, Leading Researcher (Institute of Oceanology RAS named after P. P. Shirshov, Moscow, Russia)

INTEGRATED STUDY OF THE HYDROECOLOGICAL STATE OF RESIDUAL RESERVOIRS OF THE ARAL SEA

Abstract. The article presents the results of joint research works of the complex of scientific research on the ecosystem of the Great and Small Aral sea, carried out within the framework of the AR05134202 project. The results of monitoring changes in the state of physical, chemical and biological systems of residual water masses of the Aral sea during the current ecological crisis, as well as research of mechanisms for their adaptation to the conditions of freshwater runoff insufficiency and aridization of the regional climate are presented. Based on quasi-SYNOPTIC measurements, a comparative analysis of the current state of three remaining reservoirs of the Aral sea (the Western basin of the Big sea, the Small sea, and lake Tushybas) was performed. It is shown that they are characterized by completely different physical and chemical features of the environment and biota. The results of numerical simulation show a change in the sign of the surface circulation to the opposite when inverting the bottom relief relative to the longitudinal axis of the basin. It is also established that the cycle in the bottom layer includes smaller cyclonic cycles of the sub-basin scale.

Keywords: Aral sea, halocline, mineralization, macrozoobenthos, pinochline.