

ЛИМНОЛОГИЯ И МЕРОМИКТИЧЕСКИЕ ОЗЕРА РОССИИ

LIMNOLOGY AND MEROMICTIC LAKES OF RUSSIA

АРАЛЬСКОЕ МОРЕ КАК ПРИМЕР ФОРМИРОВАНИЯ МЕРОМИКТИЧЕСКИХ ВОДОЕМОВ

Н.Ю. Андрулионис¹, А.С. Ижицкий¹, А.С. Саввичев², П.О. Завьялов¹

¹ Институт океанологии РАН, г. Москва, natalya@ocean.ru

² Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского, ФИЦ Биотехнологии РАН, г. Москва

THE ARAL SEA AS AN EXAMPLE OF THE MEROMICTIC WATER BODIES FORMATION

N.Yu. Andrulionis¹, A.S. Izhitsky¹, A.S. Savvichev², P.O. Zavialov¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow

² Winogradsky Institute of Microbiology, Research Center of Biotechnology RAS, Moscow

Аннотация. В процессе усыхания Аральское море разделилось на отдельные водоемы, физические и биогеохимические свойства вод которых существенно преобразовались, а некоторые из которых стали меромиктическими озерами. Изучение озера особенно актуально в настоящее время для прогнозирования негативных последствий и разработки путей их предотвращения в бассейнах внутренних водоемов. Для анализа изменений водных свойств Аральского моря были проведены лабораторные исследования и изучен большой объем литературных источников. Соленость воды рассчитывали суммой главных ионов, концентрации которых определяли аналитическими методами, а плотность воды водоемов измеряли на лабораторном плотномере. Микробное сообщество придонного слоя воды озера Чернышева идентифицировали методом выделения метагеномной ДНК, ПЦР-амплификации и высокопроизводительного секвенирования фрагментов гена 16S рРНК. Отдельные части Аральского моря сегодня имеют соленость от 11 до 243‰ и собственные биогеохимические свойства и отражают разные стадии продолжающейся деградации моря и метаморфизации его свойств. Большое Аральское море и его бывший залив Чернышева стали меромиктическими озерами с соленостью ~160 и ~243‰. Водная толща озера Чернышева с максимальной для аральских вод соленостью прошла несколько стадий преобразования. Сегодня он представляет собой конечную стадию деградации озера, а микробное сообщество, населяющее его, наряду с ионным составом определяют свойства его вод.

Ключевые слова. Аральское море, залив Чернышева, гиперсоленое озеро, меромиктический бассейн, основной ионный состав, микробные сообщества.

Введение

Аральское море приобрело печальную известность, став примером разрушительного антропогенного воздействия на природную среду начиная с 1960-х годов, когда в бассейне Аральского моря активизировалась хозяйственная деятельность и площадь орошаемых земель и забор воды из рек, питающих море, увеличились вдвое. Это вместе с климатическими изменениями, привело к деградации моря и необратимым преобразованиям экосистемы и социальной сферы в регионе к концу XX века [13].

С другой стороны, оно стало естественной лабораторией, позволяющей изучать морфометрическую трансформацию озера и ее последствия с целью предотвращения подобной ситуации в бассейнах внутренних водоемов. Начи-

ная с 1989 года, море последовательно разделилось на пять отдельных водоемов: четыре постоянных (западный бассейн Южного (Большого) Аральского моря, Северный (Малый) Арал, озера Чернышева и Тщebas) и один временно-наполняемый (восточный бассейн) [4]. Эти водоемы различаются по своим гидрологическим и физико-химическим свойствам [8]. Изменение минерализации и ионного состава воды оказало пагубное воздействие на экосистему Арала, а необратимые изменения солевого состава вод Арала привели к потере биологического разнообразия [14].

Впервые меромиктические свойства Аральского моря были обнаружены в глубоководной его части – западной котловине Большого Арала в 2002 г. сотрудниками ИО РАН при этом разница в солёности достигала 12 г/кг [8]. Известно, что в начале последнего десятилетия XX века водная толща Арала была еще достаточно однородна по вертикали и хорошо перемешана [3]. Между 1992 и 2002 гг. озеро перешло в меромиктическое состояние, которое со временем усиливалось [12].

Химический состав вод Аральского моря сформировался стоком рек Амударьи и Сырдарьи и уже изначально существенно отличался от состава морской воды значительно более высоким сульфатно-хлорным отношением и считался озерным [2]. В настоящее время в гипергалинных остаточных водоемах Арала относительное содержание (от общей массы ионов) сульфатов значительно снизилась, концентрация хлоридов и ионов магния возросла, а гидрокарбонаты и ионы кальция встречаются лишь в следовых количествах. Так отношение $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$, составлявшее ранее в среднем по всему морю 0,9 [3], к 2019 году снизилось в три раза [21]. Аномалии ионного состава вод Аральского моря относительно стандартной морской воды осложняют изучение его физических свойств, таких как солёность и плотность стандартным гидрофизическим оборудованием. Поэтому исследование аральских вод целесообразно проводить в лабораторных условиях, используя современное высокоточное оборудование. С 2000-х годов регулярные комплексные исследования Аральского моря проводились сотрудниками Института океанологии (ИО РАН) г. Москва.

Все исследования, проведенные после 1960-х, фиксировали необратимые изменения гидрохимического режима моря и его экосистемы, которые продолжают в отдельных водоемах Аральского моря, при этом уровень озер снижается, солёность увеличивается, а меромиктическое состояние водной толщи усугубляется. Исключение составляет слабосоленое озеро – Малое (Северное) Аральское море, которое удалось сохранить от усыхания благодаря постройке плотины [11]. Его солёность составляет 10-11‰, в то время как солёность вод Большого (Южного) Аральского моря достигли к 2019 году 140‰, озера Тщebas 60‰, а меромиктического залива Чернышева 160-242‰ [7; 8].

Целью данной работы является оценка современного состояния Аральского моря и прослеживание эволюции физических и биогеохимических свойств его вод. Для этого были проанализированы данные за весь период изучения ионного состава аральских вод и других характеристик озера с 1873 по 2022 гг. с использованием исторических данных из литературных источников и новых данных из [6].

Объекты и методы

Пробы воды из остаточных водоемов Аральского моря были получены сотрудниками ИО РАН в ходе экспедиций в Казахстане и Узбекистане. Содержание основных ионов в водах Аральского моря анализировали в соответствии с методиками, адаптированными для гиперсоленых вод [1]. Концентрации хлоридов, сульфатов, кальция, магния, гидрокарбонатов определяли методом потенциометрического титрования с помощью автоматического титратора Metrohm 905 Titrando с использованием индикаторных электродов в комплекте с соответствующим ион-селективным электродом. Соленость исследуемых образцов воды Аральского моря определяли путем суммирования концентраций основных ионов в г/кг.

Измерения плотности воды исследуемых образцов проводились в лабораторных условиях при температурах *in situ* и атмосферном давлении с помощью прецизионного плотномера Anton Paar DMA 5000M (Австрия), погрешность измерения $\pm 10^{-5}$ г/см³. Значения плотности выражали в условных единицах плотности σ_t в кг/м³.

Исследование микробного сообщества воды озера Чернышева проводилось с использованием методов выделения метагеномной ДНК, ПЦР-амплификации и высокопроизводительного секвенирования фрагментов гена 16S рРНК. Подробная методология описана [5]. Общее количество идентифицированных фрагментов 16S рРНК, использованных для идентификации микробных сообществ, составило 14 393.

Исторические данные для анализа были взяты из работ, перечисленных в [6].

Обсуждение результатов

Глубина отдельных участков озер в 2022 г. составляла 6-27 м, соленость 11-244‰, плотность 6,42-202,71 кг/м³, общая щелочность (АТ) – 2,59-16,66 ммоль/кг и рН от 7,5-8,5. Бывший залив Аральского моря, а ныне озеро Тщebas, представляет собой промежуточную стадию между Большим Аралом и озером Чернышева. Он имел соленость 114‰, но из-за небольшой глубины (до 3 м) хорошо перемешан до дна.

Самой глубокой из отделившихся частей моря остается западная котловина Большого Аральского моря, которая является меромиктическим озером с соленостью до 160‰, а σ_t до 135 кг/м³, АТ ~14,32 ммоль/кг. Водная толща озера в 2022 г. имела термохалинную стратификацию в слое ниже 15 м и химическую стратификацию ниже 20 м, на что указывало увеличения отношения $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ на 7%. Соленость вод Малого Аральского моря остается около 11‰. Это самое низкое значение по сравнению с другими водоемами и соответствует солености моря в условно-естественный период. АТ составила 2,81 и 2,59 ммоль/кг на поверхности и в придонном слое соответственно.

Бывший залив Чернышева долгое время соединялся с основной частью Большого Арала протокой, а с 2022 г. стал существовать как отдельное озеро. Меромиктическое состояние залива наблюдается с 2022 г. [9]. Соленость его вод постепенно увеличивалась, пока не достигла ~ 243-244‰, а плотность ~ 203 кг/м³ (рис. 1). В придонном слое залива фиксировалось присутствие сероводо-

рода и метана, а сезонные фазы активного перемешивания в целом не оказывали влияния на придонный анаэробный слой [4, 10]. На рисунке 1 видно, что термохалинная стратификация в водной толще озера стала к 2022 г. почти нейтральной впервые с 2002 года.

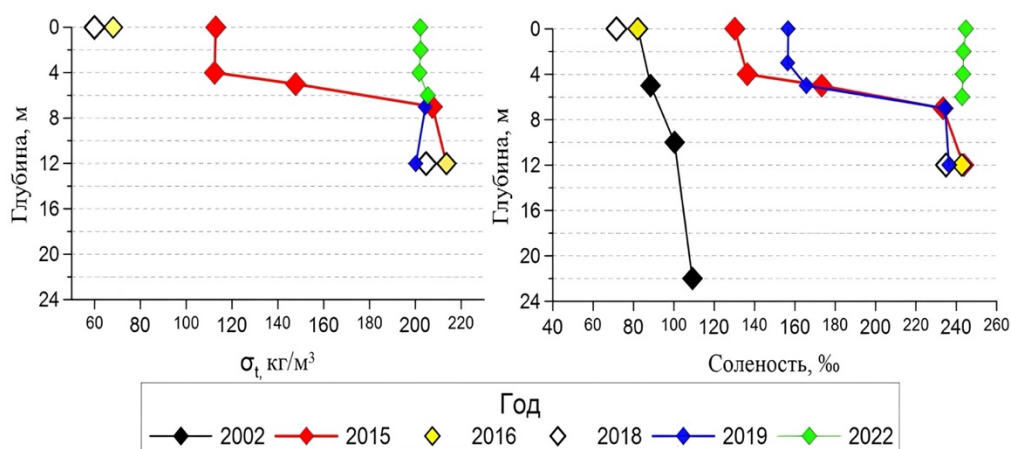


Рис. 1. Распределение солености и плотности вод залива Чернышева в процессе перехода его к меромиктическому состоянию в период с 2002 по 2022 гг. Кривые и значки солености и плотности на графике совпадают везде. Данные за 2022 г. взяты из [6]. Данных по плотности за 2002 г. не имеется.

За более чем 60 лет усыхания Аральского моря свойства его воды значительно трансформировались. Метаморфизация основного ионного состава прошла несколько этапов, представленных на рисунке 1. Продолжительность каждого этапа составляла от 1 до 112 лет наблюдений. В начале каждого этапа при повышении солености воды, выходящей за предел насыщения ионами, происходило выпадение отдельных элементов в виде нерастворимого или малорастворимого осадка.

На рисунке 2 схематично представлены 5 этапов метаморфизации основного ионного состава в период с 1873 по 2022 гг. в водах Большого Аральского моря и залива Чернышева.

На первом этапе, в диапазоне солености 11-23‰ (1960-1985 гг.) отношение $\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$ составляло 0,88, отношение $\text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+$ составляло 0,24, а отношение $\text{Ca}^{2+} / \text{Na}^+$ составляло 0,18. На втором этапе при солености 72-98‰ (2002-2006 гг.) отношение $\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$ составило 0,73, отношение $\text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+$ составило 0,24, а отношение $\text{Ca}^{2+} / \text{Na}^+$ составило 0,03. Третий этап (100-115‰) (2008-2009 гг.) характеризовался соотношением $\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$ – 0,52, соотношением $\text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+$ – 0,27 и соотношением $\text{Ca}^{2+} / \text{Na}^+$ – 0,02. Четвертый этап при солености 126-244‰ (2014–2022 гг.) относится как к Большому Аральскому морю, так и к озеру Чернышева. Отношение $\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$ в это время составило 0,31, $\text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+$ – 0,34, а $\text{Ca}^{2+} / \text{Na}^+$ осталось 0,02. Пятая стадия метаморфизации вод характерна для нижнего слоя химически стратифицированного озера Чернышева при солености 243‰ в 2022 г., где отношение $\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$ стало выше, чем наблюдалось ранее и составило 0,37, а отношение $\text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+$ стало ниже и составило 0,31, а отношение $\text{Ca}^{2+} / \text{Na}^+$ понизилось до 0,01.

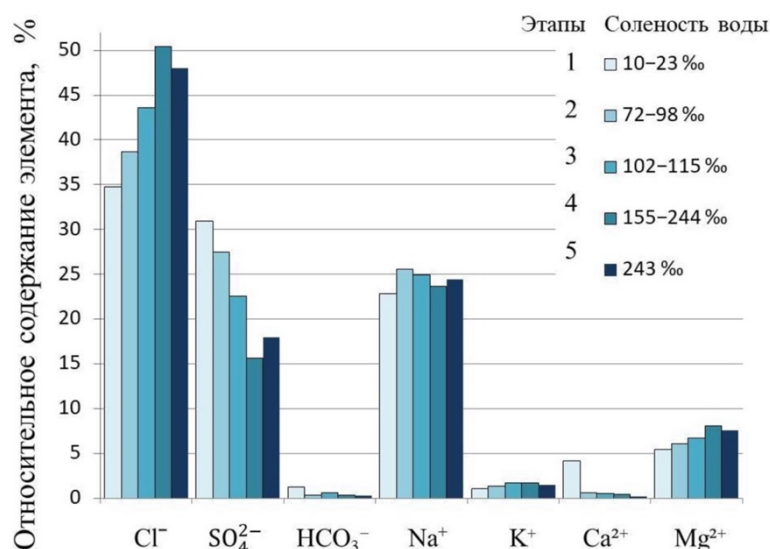


Рис. 2. Этапы эволюции основного ионного состава вод Аральского моря в период с 1873 по 2022 гг.

Был изучен таксономический состав микроорганизмов в придонном слое озера Чернышева, где 84,44% составляли археи 3 филумов: Halobacteriota (доминирующий), Nanohaloarchaeota и Nanoarchaeota. Бактериальное сообщество придонных вод озера Чернышева уступает по численности сообществу архей (ОТЕ 15,08%). Придонные воды населяли, как аэробные, так и анаэробные, а также галофильные и галотолерантные формы микроорганизмов, которые указывали на процессы метаногенеза и сульфатредукции.

Выводы

Исследования показали, что эволюция физических и биогеохимических свойств вод Аральского моря продолжается. Было обнаружено, что она прошла пять этапов метаморфизации ионного состава. Максимальная соленость вод озера достигает 243‰ в бывшем заливе Чернышева, который является примером финальной стадии деградации Аральского моря. А населяющие его микроорганизмы, наряду с ионными модификациями, обуславливают его свойства.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания FMWE 2024–0015 и при частичной поддержке РФФИ и DFG (проект № 20-55-12007). Авторы выражают благодарность всем участникам аральских экспедиций за сбор и доставку проб воды.

Литература

- [1] Андрулионис Н.Ю., Завьялов П.О. Лабораторные исследования основного компонентного состава гипергалинных озер // Морской гидрофизический журнал, 2019. Т. 35, № 1. С. 16-36.
- [2] Блинов Л.К. Гидрохимия Аральского моря. Л.: Гидрометеиздат, 1956. 233 с.

- [3] Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Проект «Моря СССР». Т. 7: Аральское море. Под ред. В. Н. Бортника, С. П. Чистяевой. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 196 с.
- [4] Завьялов П.О., Арашкевич Е.Г., Бастида И. и др. Большое Аральское море в начале XXI века: физика, биология, химия. М.: Наука, 2012. 229 с.
- [5] Саввичев А.С., Демиденко Н.А., Кадников В.В., Беленкова В.В., Русанов И.И., Горленко В.М. Состав микробных сообществ как индикатор состояния водоемов, расположенных на морском побережье (на примере залива Канда, Канда-лакшский залив Белого моря) // Микробиология, 2023. Т. 92, № 6. С. 595-608.
- [6] Andrulionis, N.Y., Izhitskiy, A.S., Savvichev, A.S., Zavialov, P.O. Recent changes in physical and biogeochemical state in residual basins of the Aral Sea // Aquatic Geochemistry, 2025. V. 31, №1.
- [7] Andrulionis N.Y., Zavialov P.O., Izhitskiy A.S. Current evolution of the salt composition of waters in the Western Basin of the South Aral Sea // Oceanology, 2021. T. 61, № 6. P. 899-908.
- [8] Andrulionis N.Yu., Zavialov P.O., Izhitskiy A.S. Modern evolution of the salt composition of the residual basins of the Aral Sea // Oceanology, 2022. V. 62, №1. P. 30-45.
- [9] Friedrich J., Oberhansli H. Hydrochemical properties of the Aral Sea water in summer 2002 // Journal of Marine Systems, 2004. V. 47. P. 77-88. 135.
- [10] Izhitskaya E., Egorov A., Zavialov P., Yakushev E., Izhitskiy A. Dissolved methane in the residual basins of the Aral Sea // Environ. Res. Lett., 2019. 14:065005.
- [11] Izhitskiy A.S. Thermal regime of the Small Aral Sea in conditions of climate change // J. Oceanologic Res., 2023.V. 51, № 2. P. 3-20.
- [12] Izhitskiy A.S., Kirillin G.B., Zavialov P.O. The Aral Sea as a natural “sun pond”: extreme conditions of temperature and mixing. In: Conference: The international symposium «Mesoscale and Submesoscale Processes in the Hydrosphere and Atmosphere». 2018.
- [13] Kostianoy A., Kosarev N. (eds.). The Aral Sea Environment. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York, 2010332. eBook ISBN 978-3-540-88277-0.
- [14] Sapozhnikov P., Kalinina O. Main results of observations of changes in bottom biota and ichthyofaunal of the Large Aral Sea in the period 2002-2017 // Hydrosph. Ecol., 2018. V. 1. P. 2-14.

S u m m a r y. The Aral Sea divided into separate water bodies during the drying process and some of which became meromictic lakes. The physical and biogeochemical properties of their waters of have significantly transformed. Laboratory studies were conducted and a large volume of literary sources were studied to analyze changes in the water properties of the Aral Sea. The concentrations of which were determined by analytical methods, and the water density was measured on a laboratory densitometer. The microbial community of the bottom layer of Chernyshev Lake water was identified by isolating metagenomic DNA, PCR amplification and high-throughput sequencing of 16S rRNA gene fragments. Individual parts of the Aral Sea today have salinity from 11 to 243‰. different properties and reflect different stages of the ongoing degradation of the sea. The Large Aral Sea and Chernyshev Lake (final stage of lake degradation) are meromictic lakes with salinity of ~160 and ~243‰.