

УДК 551.465

СОВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СОЛЕВОГО СОСТАВА ОСТАТОЧНЫХ БАССЕЙНОВ АРАЛЬСКОГО МОРЯ

© 2022 г. Н. Ю. Андрулионис¹, *, П. О. Завьялов¹, **, А. С. Ижицкий¹, ***¹Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*e-mail: natalya@ocean.ru

**e-mail: peter@ocean.ru

***e-mail: izh@ocean.ru

Поступила в редакцию 30.06.2020 г.

После доработки 10.11.2020 г.

Принята к публикации 08.04.2021 г.

Новые гидрохимические данные для остаточных водоемов Аральского моря (Малого Арала, залива Чернышева, а также озера (бывшего залива) Тшебас) получены в результате экспедиций на территории Казахстана в 2015, 2016, 2018 и 2019 годах. Сравнение полученных данных с историческими данными свидетельствуют о продолжающейся в настоящее время эволюции солевого состава вод Аральского моря. В разных остаточных водоемах эти процессы идут разными путями и существенно влияют на изменение физических свойств их вод, таких как плотность, соленость, температура замерзания, а также нормы испарения. Исследования воды остаточных водоемов Аральского моря позволили обнаружить рост концентрации сульфатов в Малом Арале и оценить значение влияния стока реки Сырдарья на его солевой состав. В меромиктическом заливе Чернышева в период с 2018 по 2019 наблюдалось резкое ослабление стратификации воды более чем в два раза, что сопровождалось изменением соотношений основных ионов. Для озера Тшебас наоборот наблюдалось постоянство соотношений основных ионов при значительных межгодовых колебаниях уровня и солености его воды.

Ключевые слова: ионный состав, гипергалинный водоем, Аральское море, соленые озера, залив Чернышева, озеро Тшебас, Малое Аральское море, река Сырдарья

DOI: 10.31857/S0030157422010026

ВВЕДЕНИЕ

Гидрохимические параметры воды, такие как основной ионный состав, общая щелочность, pH среды, соленость и плотность являются важными показателями состояния водоема. Исследование ионного состава Аральского моря позволяет изучить механизмы образования рассолов в гипергалинных озерах и прогнозировать состояние соленых озер в зависимости от изменений окружающей среды.

Аральское море образовалось более 10000 лет назад, и в середине XX века было четвертым по площади внутриматериковым водоемом. С 1960 г. уровень Аральского моря неуклонно снижается из-за существенно сократившегося стока рек Сырдарья и Амударья в результате реализации ирригационных проектов Советского Союза. Реки представляли собой важнейшую составляющую водного баланса моря. Воды реки Амударья, когда-то пополнявшие Аральское море с юго-востока, сейчас доходят до моря лишь эпизодически, так как разбираются на орошение и хозяй-

ственные нужды населения. Сток реки Сырдарья, которая впадает в Аральское море с северо-востока, к настоящему времени снизился в 2–7 раз по сравнению со средними значениями, характерными для периода до 1960 г. Аральское море перестало существовать как единое целое и разделилось на несколько водоемов, связанных периодически высыхающими протоками [26, 36]. Но, как предполагается, причины усыхания Аральского моря, только на 80% имеют антропогенный характер, а на 20% — климатический, связанный с общим усилением засухливости во всей Средней Азии [15].

До 1960 г. уровень Аральского моря испытывал лишь слабые (менее 1 м) сезонные и межгодовые колебания вокруг отметки 53 м над уровнем океана [3]. В 1989 г. поверхность моря опустилась до уровня около 38 м [26], и озеро впервые разделилось на два отдельных водоема, а именно на так называемые Малое Аральское море на севере, и Большое Аральское море на юге. В 2003 г. Большое Аральское море также разделилось на два бассейна — восточный и западный, соединенные

узким и длинным каналом. В 2004 г. при уровне Большого Арала около 31 м, небольшой залив Тшебас отделился от западного бассейна Большого Аральского моря и образовал изолированное озеро [36]. К началу 2010-х гг. в процессе обмеления западного бассейна Большого Арала его северная оконечность — залив Чернышева — также превратился в почти изолированный водоем. Он до сих пор соединен с основной частью бассейна протокой. Летом 2010 г. восточный бассейн Большого Аральского моря практически высох, и лишь время от времени наблюдается его частичное повторное наполнение на непродолжительное время, связанное с сезонными климатическими и антропогенными явлениями [5]. На сегодняшний день среди разделившихся частей Аральского моря западный бассейн Большого Арала остается самым глубоким. В 2017 году его максимальная глубина составляла 29.5 м [2]. В данной работе этот водоем не рассматривается.

Таким образом, в результате усыхания за 60 лет Аральское море потеряло более 90% объема и превратилось в комплекс нескольких отдельных водоемов с различными гидрологическими и гидрохимическими свойствами [26, 35]. Значительное сокращение площади моря существенно повлияло на климат в Приаралье [27], а также вызвало упадок рыболовства, катастрофическое снижение биоразнообразия природных экосистем самого моря и дельтовых районов рек, а также увеличение частоты и силы солевых и пылевых бурь [34], которые негативно влияют на здоровье населения в регионе [24, 34]. Масштаб пылевых выносов с обсохшего дна Аральского моря оценивается разными авторами величиной от 15 до 75 млн тонн в год [20].

Высыхание привело к изменению морфометрических характеристик воды Аральского моря, а также к глубоким преобразованиям физического и химического режимов в его отдельных частях [6]. В процессе усыхания Аральского моря произошло выпадение таких минералов, как карбонаты кальция и натрия, гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, мирабилит $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, глауберит $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$, галит NaCl и др. [5, 6].

Целью настоящей работы было получить новые гидрохимические данные для исследуемых остаточных водоемов Аральского моря: Малого Аральского моря, залива Чернышева, озера Тшебас, а также реки Сырдарья. Характеристики самой большой и глубокой части Аральского моря (Большой Арал) в рассматриваются в отдельных работах [2, 5, 36]. Были определены концентрации основных ионов, общая щелочность, pH, а также плотность воды в образцах вод исследуемых водоемов. Соленость исследуемых образцов определяли по сумме содержания основных ионов, поскольку определение солености вод ги-

пергалинных водоемов при помощи стандартного гидрофизического измерительного оборудования приводит к большим погрешностям вследствие отличия их ионно-солевого состава от “канонического” океанского [6, 22]. Уточнение вариаций состава образцов океанической воды также становится все более и более актуально с точки зрения их относительного вклада в плотность [32]. Отдельной задачей было оценить влияние речного стока Сырдарьи на формирование состава вод Малого Аральского моря.

Основной задачей было на основании полученных данных проследить изменения (эволюцию), которые произошли в солевом составе вод Аральского моря вследствие снижения его уровня, повышения солености, процессов метаморфизации вод, определить закономерности в соотношениях основных компонентов ионного состава и других характеристик вод моря в изменяющихся гидрологических условиях. Для этого мы сравнили полученные результаты с историческими данными, имеющимися в литературе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб проводился в 2015, 2016, 2018 и 2019 гг. из остаточных водоемов Аральского моря на территории Казахстана. Основные характеристики станций, месяцы и годы отбора проб указаны в табл. 1. Схематично расположение водоемов и станций показано на рис. 1.

Отбор и хранение проб осуществлялись в соответствии со стандартами [8, 9, 17]. Пробы отбирали в пластиковые бутылки объемом 0.5–1 л, которые предварительно ополаскивали водой из отбираемой пробы. В течение 3–7 дней пробы доставляли в лабораторию для последующего анализа.

Взятые за основу существующие методики определения ионов в морской и питьевой воде [16, 23, 31] модифицировались с учетом особенностей химического состава вод исследуемых водоемов. Методы определения концентраций основных ионов подробно описаны в [2]. Определение общей щелочности и общего растворенного неорганического углерода проводили в соответствии с [16, 17]. Общий растворенный неорганический углерод рассчитывали из общей щелочности и выражали как HCO_3^- .

Хлорность, концентрации сульфатов, кальция, магния и общую щелочность определяли методом потенциометрического титрования. Для этого использовался автоматический потенциометрический титратор Metrohm 905 Titrando с индикаторными электродами для каждого метода (табл. 2). Перед анализом пробы фильтровали через мембранный фильтр GFF 0.7 мкм для удаления взвеси и органических веществ и помещали в стеклянные емкости 100–250 мл. Оптимальный

Таблица 1. Основные характеристики станций пробоотбора в отдельных водоемах Аральского моря и реки Сырдарья в 2015–2019 гг.

Место отбора проб	Название станции	Макс. глубина в точке отбора проб, м	Год отбора проб	Месяц отбора проб	Координаты
Залив Чернышева	C5	13	2016	Июнь	45°57'38.8" с.ш. 59°13'57.4" в.д.
		12.5	2018	Сентябрь	45°57'43.02" с.ш. 59°13'32.08" в.д.
		12.9	2019		45°57'35.1" с.ш. 59°13'56.2" в.д.
Озеро Тшебас	T1	Нет данных	2015	Октябрь	46°18'38.50" с.ш. 59°35'8.30" в.д.
	T5	5.1	2018	Сентябрь	46°15'31.9" с.ш. 59°38'59" в.д.
	T1	3.5	2019		46°17'57" с.ш. 59°36'59.5" в.д.
Малое Аральское море	M2	0 4.6	2015	Октябрь	46°11'43.02" с.ш. 60°57'19.20" в.д.
	M1	0 11.9	2018	Сентябрь	46°32'25" с.ш. 60°3'24.8" в.д.
	M1	0 12.9	2019	Сентябрь	46°32'25" с.ш. 60°3'24.8" в.д.
	K1	Нет данных			46°6'1" с.ш. 60°47'44.3" в.д.
Река Сырдарья	Без названия	Нет данных	2015	Октябрь	46°06'49" с.ш. 61°29'58.8" в.д.
			2018	Сентябрь	Нет данных
			2019		46°01'29.1" с.ш. 61°03'10.4" в.д.

Таблица 2. Методы анализа и электроды для потенциометрического титрования

Определяемые ионы	Методы анализа	Электроды
Cl ⁻	Осадительное титрование титрант – раствор AgNO ₃	Комбинированный электрод Ag Titrode (Metrohm)
SO ₄ ²⁻	Осадительное титрование титрант – раствор BaCl ₂	Ва-ионселективный полимембранный (Эком-Ва) и электрод сравнения хлорсеребряный
HCO ₃ ⁻	Кислотно-основное рН-титрование HCl	Комбинированный рН-электрод iEcotrode plus (Metrohm)
Ca ²⁺	Комплексонометрическое титрование, ЭДТА	Комбинированный Са – селективный полимер-мембранный электрод (Metrohm)
Mg ²⁺		
K ⁺	Гравиметрическое определение (осаждение тетрафенилборатом натрия)	
Na ⁺	Определение разницы между суммой анионов и катионов в моль-эквивалент	

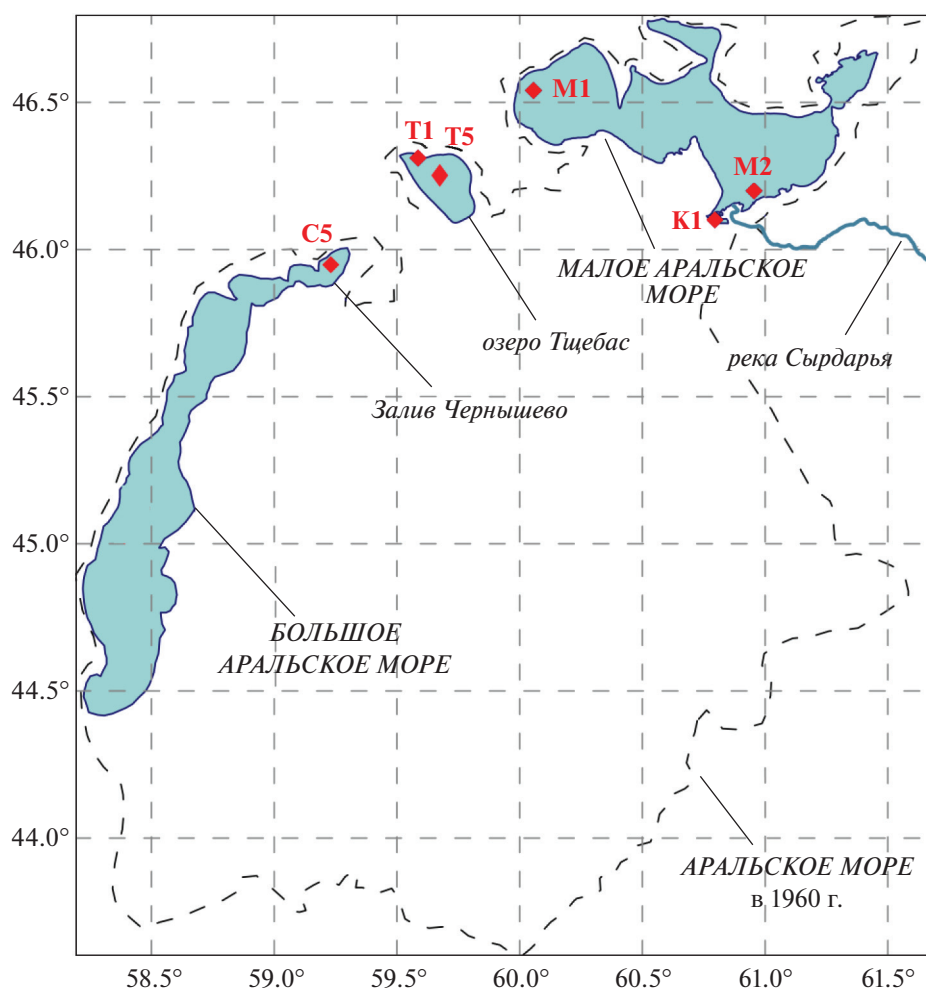


Рис. 1. Схема современного Аральского моря и расположение станций пробоотбора.

объем образца для каждого анализа определялся опытным путем в зависимости от солености пробы. Соленость образцов варьировалась в пределах от 1.25 до 243 г/кг. В ходе измерения при необходимости пробы разбавляли деионизированной водой.

Концентрации ионов калия определяли гравиметрическим методом [7, 23, 28], который позволил получить заметно меньшую величину относительного стандартного отклонения по сравнению с титрованием, где большое количество используемых реактивов вносило большую погрешность. Для определения концентраций калия в образцах слабосоленых вод Малого Арала пробы разбавляли в 2 раза водой, а пробы р. Сырдарья не разбавляли. Натрий определяли по разнице между суммами анионов и катионов в моль-эквивалент, затем пересчитывали в г/кг [31]. Определение натрия потенциометрическим титрованием в образцах гипергалинных водоемов приводит к значительным погрешностям из-за высокого содержания его в пробах.

Для приготовления растворов реактивов и разбавления проб использовали деионизированную воду (электропроводность <0.2 мкСм), которую получали с помощью лабораторного деионизатора.

Измерения плотности проводились с помощью плотномера Anton Paar DMA 5000 M. Точность измерения плотности воды $\pm 10^{-6}$ г/см³ [18]. Перед началом работ измерительную ячейку промывали спиртом 95% и деионизированной водой. Затем проводили калибровку согласно инструкции с использованием деионизированной воды [18]. Плотность измеряли при температурах 20, 21, 23, 25°C при атмосферном давлении. Для каждой пробы проводили измерения с трехкратной повторностью. За результат принимали среднее значение.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Отдельные остаточные водоемы Аральского моря сильно отличаются друг от друга по физическим и химическим свойствам вод (табл. 3).

Таблица 3. Гидрохимические характеристики образцов воды реки Сырдарья и отдельных водоемов Аральского моря, отобранных в сентябре 2019 года

Станция	Глубина. м	pH	S, г/кг	ρ , г/см ³ $t = 20, 21, 23,$ 25°C	A_T , ммоль/кг	Анионы, г/кг			Катионы, г/кг			
						Cl	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
река Сырдарья												
—	0	7.1	1.25	0.999372 0.999160 0.998704 0.998208	2.170	0.11	0.64	0.15	0.16	0.02	0.11	0.07
Малое Аральское море												
K1	0	7.2	9.22	1.006426 1.006199 1.005717 1.005198	3.126	2.38	3.38	0.21	2.30	0.09	0.40	0.46
M1	0	7.0	10.69	1.006791 1.006564 1.006083 1.005564	2.496	2.84	3.90	0.17	2.65	0.12	0.50	0.50
	12.4	7.0	10.48	1.006776 1.006548 1.006067 1.005548	2.544	2.85	3.76	0.17	2.84	0.10	0.49	0.26
Залив Тицебас												
T1	0	8.2	59.99	1.047556 1.047259 1.046638 1.045983	3.89	22.08	17.52	0.21	15.00	1.17	0.68	3.34
	3.4	8.0	59.92	1.047499 1.047193 1.046574 1.045929	4.001	22.03	17.47	0.23	14.57	1.51	0.71	3.42
Залив Чернышева												
C5	0	7.9	156.74	—	9.59	72.46	30.68	0.44	39.73	2.23	0.53	10.68
	3	7.9	156.97	—	11.888	73.45	29.38	0.45	40.11	2.34	0.60	10.63
	5	7.7	165.62	—	12.380	74.10	34.83	0.51	42.39	2.44	0.56	10.79
	7	7.3	234.49	—	13.12	84.62	69.95	0.88	62.43	3.82	0.35	12.44
	12	7.3	236.36	1.200238 1.199779 1.198831 1.197873	13.96	85.72	70.08	0.85	63.77	3.26	0.40	12.29

Примечание. S – соленость, рассчитана как сумма компонентов основного ионного состава; A_T – общая щелочность; ρ – плотность воды.

Из таблицы видно, что образцам с более высокой соленостью в целом соответствуют более высокие значения их плотности и щелочности.

Измерению плотности образцов из залива Чернышева, полученных с глубин от 0 до 5 м, помешал нерастворимый в воде осадок, который

образовался вскоре после вскрытия пластиковой бутылки с водой. Для измерения концентраций ионов этот осадок растворяли добавлением концентрированной азотной кислоты и учитывали добавленное количество кислоты при расчете результата. В образцах с горизонтов 7 и 12 м такого

Таблица 4. Концентрации основных ионов и другие гидрохимические параметры воды Малого Аральского моря в августе 2002 [25], октябре 2015 и в сентябре 2019 гг.

Станция	Глубина м	pH	S, г/кг	ρ, г/см ³ <i>t</i> = 21°C	<i>A</i> _T , ммоль/кг	Анионы, г/кг, %			Катионы, г/кг, %					
						Cl	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺		
2002														
Station 1	0	8.4	17.74	Нет данных		5.94	6.08	0.22	3.73	0.21	0.56	1.01		
						33.5	34.3	1.2	21.0	1.2	3.2	5.7		
	7	8.3	17.65			5.92	6.07	0.22	3.71	0.20	0.54	0.99		
						33.5	34.4	1.2	21.0	1.1	3.1	5.6		
2015														
M2	0	8.0	9.94			1.006147	2.882	2.71	3.56	0.17	2.32	0.10	0.52	0.58
								27.2	35.8	1.7	23.4	1.0	5.2	5.8
	4.6	7.9	10.05			1.006152	2.917	2.82	3.54	0.16	2.47	Нет данных	0.51	0.57
				28.1	35.2			1.6	24.6	5.0	5.6			
2018														
M1	0	8.0	10.71	1.006722	2.919	2.92	3.83	0.18	2.54	0.12	0.56	0.57		
						27.2	35.7	1.7	23.7	1.1	5.2	5.3		
	11.9	8.1	10.67	1.006392	2.912	2.88	3.84	0.17	2.53	0.14	0.53	0.58		
						27.0	35.9	1.6	23.7	1.3	5.0	5.5		
2019														
M1	0	6.9	10.68	1.006564	2.495	2.84	3.90	0.17	2.17	0.12	0.50	0.50		
						27.8	38.2	1.7	21.3	1.2	4.9	5.0		
	12.4	7.0	10.48	1.006548	2.544	2.85	3.76	0.17	2.84	0.10	0.49	0.26		
						27.2	35.9	1.7	27.1	1.0	4.7	2.5		

Примечание. В первой строке, относящейся к образцу, значения указаны в г/кг, а во второй курсивом – в % к общей солености образца. Обозначения см. табл. 3.

осаждения не наблюдалось и поэтому растворение не проводили.

Из табл. 3 видно, что в образце речной воды из Сырдарьи преобладают сульфат-ионы, гидрокарбонаты и ионы кальция. Массовое соотношение SO_4/Cl в 2019 г. в образце речной воды составило 5.99, HCO_3/Cl – 1.36, Ca/Na – 0.73. Соотношения основных ионов в образце воды Сырдарьи существенно отличаются от вод образцов водоемов Аральского моря.

В Малом Арале соотношение SO_4/Cl в 2019 г. составило на станции *M1* на поверхности 1.37, на дне – 1.33, а на станции *K1* на поверхности – 1.42. Соотношение HCO_3/Cl составило 0.06 на поверхности и на дне, для станции *K1* на поверхности – 0.09. Соотношение Ca/Na составило 0.23, 0.17 и 0.17 соответственно. Разница в концентрациях основных ионов в поверхностном и придонном уровнях незначительна. Это говорит об эффективном перемешивании вод этого водоема.

По историческим данным двадцатилетней давности, вода Малого Арала относилась к суль-

фатно-натриево-магниевому типу [1], этот же тип характеризует ее и сейчас. Также в работе [1] отмечается, что в составе воды Аральского моря по мере распреснения происходит снижение относительных концентраций хлоридов и щелочных металлов, а концентрации остальных элементов возрастают. Сульфаты начинают “доминировать” при солености от 7 г/кг до 15 г/кг [1]. Эти особенности наблюдаются и в наше время и подтверждаются результатами наших исследований на станциях *M1* и *M2* как в 2019, так и в 2016 и 2018 гг. (табл. 4).

В отличие от *M1* станция *K1* располагалась в приустьевой зоне на противоположной стороне озера (рис. 1). Проба воды полученная на станции *K1* имеет промежуточные характеристики между составом речной воды и воды Малого моря. Наблюдаемое в данной точке преобладание сульфат-ионов и гидрокарбонат-ионов характерно и для вод реки Сырдарья, которая является основным поставщиком воды в Малое Аральское море. Содержание остальных ионов близко к содержанию их в основной части Малого Арала. Значение

солености на станции *K1* на 13% ниже по сравнению с соленостью воды на станции *M1*, значение pH в этой зоне ближе к значению pH реки (табл. 3).

Для озера Тшебас в 2019 г. характерна небольшая глубина (менее 3 м), высокая степень перемешанности и преобладание ионов хлора, натрия и магния в солевом составе. Соленость озера в поверхностном и в придонном слоях была практически одинаковая и составляла около 60 г/кг. По относительному содержанию основных ионов Тшебас занимает промежуточное положение между солоноватым Малым морем и гипергалинным Большим Аральским. Хлоридов в воде оз. Тшебас в 1.3 раза больше, чем в Малом Арале, но в 1.3 раза меньше, чем в заливе Чернышева на поверхности и почти соответствует содержанию их в придонном слое. Относительное содержание сульфат-иона в озере в 1.3 раза меньше, чем в Малом Арале, но в 1.5 раз больше, чем в поверхностном слое залива Чернышева на поверхности и почти соответствует содержанию в придонном слое залива Чернышева. Содержание гидрокарбонат-иона в 5 раз меньше, чем в Малом Арале и практически соответствует придонному слою залива Чернышева и в 1.3 раза меньше его поверхностного слоя. Относительное содержание ионов кальция здесь в 4 раза ниже, чем в Малом Аральском море, но в 3 и 6 раза больше, чем в заливе Чернышева на поверхности и у дна. Содержание магния — в 1.1 раз больше, чем в Малом Арале и в 1.2 раза меньше, чем в заливе Чернышева на поверхности и в 1.1 раз больше, чем у дна. Относительное содержание ионов калия в озере Тшебас на поверхности в 1.7, а в придонном слое в 2.6 раз больше, чем в Малом Арале, в 1.4 раза больше чем в заливе Чернышева на поверхности и в придонном слое. Калий и магний являются самыми консервативными ионами в составе вод соляных озер, так как их соли в основном хорошо растворимы в водных растворах и массово выпадают в последнюю очередь. Калий осаждается в виде минералов сильвина KCl и карналлита $KMgCl_3 \cdot 6H_2O$, которые образуются в современных соляных озерах из остаточной рапы в период высыхания или на стадии “сухого озера” в верхней части соляной залежи [4, 14, 19]. На определенной стадии, возможно, наблюдается выпадение карбонатов магния, но их количество очень мало [5]. Из этого следует, что богатые калием воды озера Тшебас не достигли еще состояния “рапы”. Соотношение SO_4/Cl в 2019 г. составило на станции *T1* 0.79 на поверхности и на дне, HCO_3/Cl — 0.01 на поверхности и на дне, соотношение Ca/Na — 0.05 на поверхности и на дне.

Залив Чернышева уже много лет является мезомиктическим водоемом [26]. Анализ образцов его вод выявил присутствие стратификации и в 2019 г. Плотностной скачок находился на глубине

около 7 метров. Разница в солености между поверхностным и придонным слоями составила около 80 г/кг. В ионном составе обоих слоев преобладают галоген-ионы, но в поверхностном слое их в 1.3 раза больше, чем в придонном, а сульфат-иона в 1.5 раза меньше. Соотношение SO_4/Cl в 2019 г. в точке *C5* составило на поверхности 0.42, а на дне 0.82. Это свидетельствует о химической стратификации вод залива наряду с термохалинной, которая была установлена ранее [26]. Соотношение HCO_3/Cl одинаково на поверхности и у дна — 0.01, а соотношение Ca/Na составило 0.013 на поверхности и 0.006 у дна.

Анализ образцов воды, отобранных в сентябре 2019 г. показал существенные различия отдельных водоемов современного Аральского моря, как в основном солевом составе вод, так и в других параметрах.

Из графика представленного на рис. 2 видно, как изменяется отношение ионов к хлорности в воде Аральского моря по мере увеличения ее солености, то есть — по мере усыхания моря. Порядок выпадения солей, происходящий с разной интенсивностью определяет метаморфизацию состава вод. На графике видно, что первым выпадает из раствора гидрокарбонат кальция (круги и треугольники, желтая и зеленая линии). К моменту достижения рассолом солености более 156 г/кг, то есть соответствующей поверхностному слою залива Чернышева, гидрокарбонат-ионы и ионы кальция в составе воды встречаются уже в виде следов. В это же время происходит выпадение из состава воды сульфат-ионов, вероятно, сначала до значений солености 156 г/кг в виде гипса, а затем эпсомита и мирабилита. Одновременно происходит снижение содержания ионов натрия. В бескислородном придонном слое залива Чернышева, при солености 236 г/кг наблюдается рост относительного содержания сульфат-ионов и катионов магния и натрия. Натрию свойственно повторное растворение из осажденных солей $NaCl$ и Na_2SO_4 . В работе [25] описаны наблюдения и проведены оценки поступления сульфатов в воду в результате выделения их из донных отложений. Таким образом, исходя из графика на рис. 2, можно предположить, что в процессе эволюции до достижения значений солености 156 г/кг из воды Аральского моря выпадает практически весь кальций и гидрокарбонаты, которые, вероятно, преобразуются в карбонаты кальция. В это же время наблюдается стабильное снижение содержания сульфатов и натрия. А в условиях более высокой солености и отсутствии кислорода происходит восстановление сульфатов. На рис. 2 видно, что относительное содержание магния в придонном слое несколько выше, чем в поверхностном. Повышенное содержание ионов калия в образцах Малого Арала связано с его поступлени-

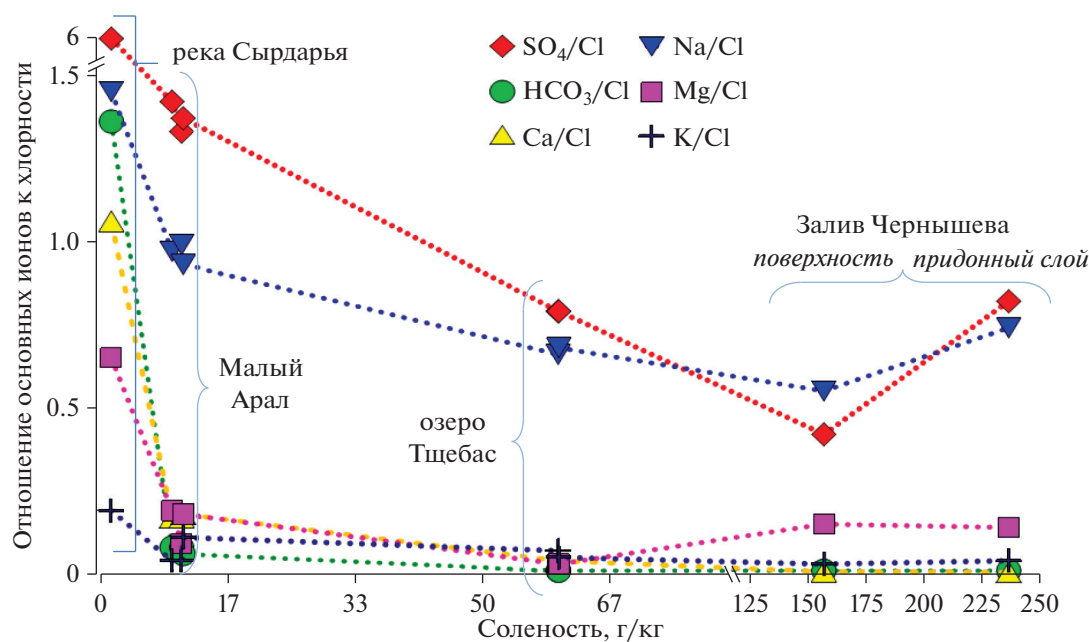


Рис. 2. Изменение соотношений основных ионов в зависимости от солёности для отдельных образцов водоемов Аральского моря по данным за 2019 г.

ем с водами реки Сырдарья, где его количество превышает предельно допустимые концентрации [12] и куда он попадает с водами из дренажно-коллекторных бассейнов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Далее мы представляем более подробное описание гидрохимических характеристик каждого отдельного водоема и их изменений за годы наблюдений основываясь, в том числе, и на исторических данных.

Малое Аральское море. До 1960 г. Аральское море в районе современного Малого Арала характеризовалось солёностью 10.0–10.5 г/кг [3]. На протяжении последующих десятилетий солёность Малого моря нарастала, и в начале 2000-х гг. она составляла около 34 г/кг [1]. Однако после постройки дамбы, удерживающей сток р. Сырдарья, солёность вернулась практически к прежним значениям 10–11 г/кг, но при существенно изменённом ионно-солевом составе. Первоначально последний занимал промежуточное положение между морским хлоридно-натриевым и континентальным гидрокарбонатно-кальциевым типами вод [3]. В 1952 г. соотношение SO_4/Cl по массе составляло для Малого Арала (как и для всего моря) около 0.9 [3]. К 2019 г. по нашим данным оно увеличилось в 1.5 раза (табл. 4) и составило 1.33–1.37. Этот вывод кажется парадоксальным, поскольку в ходе химической метаморфизации, происходившей при росте солёности, в первую очередь потребляется сульфат-ион, а не хлорид.

Поэтому можно было бы ожидать уменьшения, а не увеличения сульфатно-хлоридного соотношения. Однако, как справедливо указано в работе [1], “солёность и химический состав воды по всей акватории Малого Аральского моря, прежде всего, зависят от объёма поступающего речного стока”. В период с 1993 по 2006 гг. сток р. Сырдарья колебался в пределах от 3.5 до 9 км³/год [1]. Воды р. Сырдарья характеризуются повышенным содержанием сульфатов, а также гидрокарбонат-ионов и ионов магния. Вероятно, именно по этой причине современное содержание этих ионов в воде Малого моря выше, чем было в 1990-е годы.

В табл. 4 приведены концентрации основных ионов в г/кг и в процентном отношении (по массе) к общей солёности образца воды Малого Аральского моря. Как видно из этой таблицы, солёность и соотношения компонентов основного ионного состава практически одинаковы в поверхностном и придонном слоях, но существенно меняются от года к году. Изменения содержания основных ионов в воде Малого Аральского моря в поверхностном и придонном слоях в период 2002–2019 гг. по нашим данным и литературным данным [25] показаны на рис. 3. На рисунке хорошо заметна тенденция к повышению относительного содержания сульфат-иона, особенно в поверхностном слое озера. По сравнению с данными 2002 г. [25] соотношение SO_4/Cl повысилось в 1.3 раза, HCO_3/Cl – в 1.6 раз, Ca/Cl – в 1.8 раз, Na/Cl – в 1.2 раз, Ca/Mg – в 1.8 раз. Соотношения Mg/Cl и K/Cl практически не изменились.

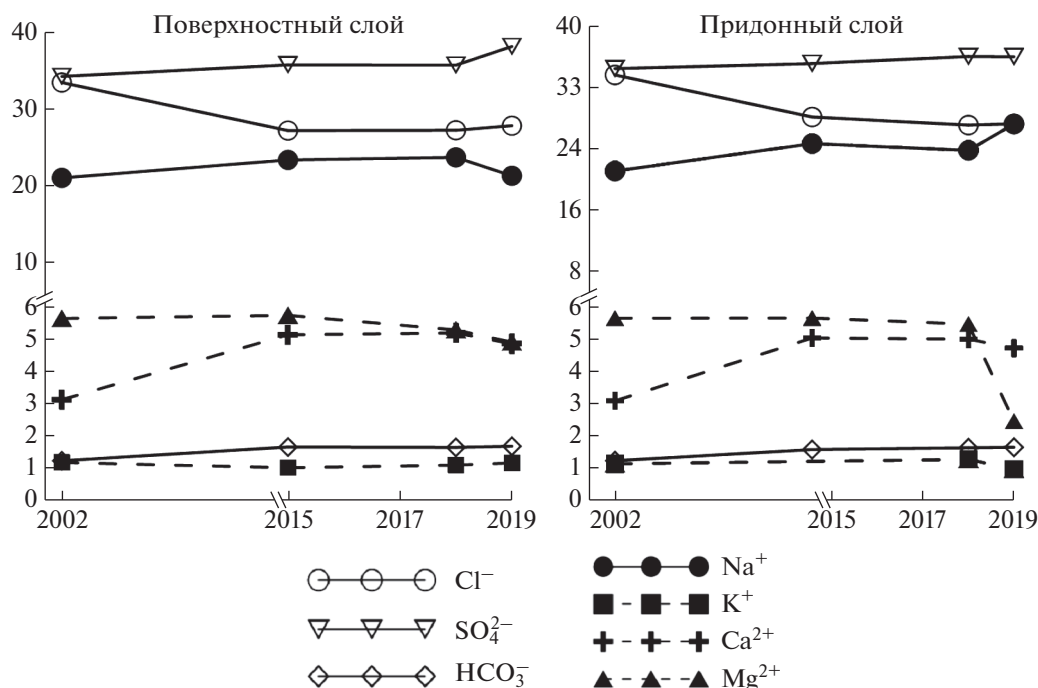


Рис. 3. Изменение основного ионного состава в воде Малого Аральского моря за период 2002–2019 гг., выраженное в процентах к солёности образца (по массе).

Для того чтобы оценить влияние речного стока на ионный состав воды Малого моря, мы изучили литературные данные и провели следующие расчеты. Сток р. Сырдарья в среднем составляет 5.9 км^3 в год [30], а содержание сульфат-ионов в речной воде в среднем за период 2015–2019 гг. по нашим данным составляло 0.7 г/кг . Отсюда следует, что поступление сульфат-ионов в море со стоком реки составляет около 4.1 млн. тонн в год. Содержание сульфатов в Малом Арале по нашим расчетам, основанным на объеме воды 27 км^3 [21] составляло в 2018 г. 103.8 млн. тонн , а к 2019 году — 105.8 млн. тонн . Таким образом, прирост содержания сульфат-ионов за год составил 1.9 млн. тонн . Этот прирост может полностью обеспечиваться поступлением ионов из реки (4.1 млн. тонн). Избыток сульфат-ионов в размере 2.2 млн. тонн , вероятно, уходит со сбросами воды через плотину в Большое Аральское море. Не исключен и вклад сульфатов в результате растворения их солей, например, гипса и ангидрита [19] из донных отложений [25].

На основании наших наблюдений и расчетов можно сделать вывод, что основной компонентный состав и другие гидрохимические характеристики моря меняются из года в год. При сохранении существующих гидрологических условий Малого Аральского моря изменение его ионного состава воды в сторону повышения концентраций ионов, преобладающих в реке, а особенно сульфатов, вероятно, будет продолжаться.

Озеро Тшебас. Озеро Тшебас (иногда в литературе встречается также название Тушибас) когда-то представляло собой залив Аральского моря с глубиной до 30 м [3]. Залив отделился от основной части и образовал в 2004 г. отдельное озеро [5], которое располагается между Малым и Большим Аралом (см. рис. 1) и является третьим по величине непересыхающим озером на территории бывшего Аральского моря. В 2002 г. средняя глубина озера Тшебас составляла около 6 м [25]. По нашим данным в октябре 2015 г. максимальная глубина составила 4.2 м , в сентябре 2018 г. — около 5 м , а в 2019 г. — менее 4 м . Наполняется озеро за счет эпизодического поступления вод из Малого Арала при попусках через Кокаральскую плотину, а также атмосферных осадков и, вероятно, подземного стока. Интенсивность поступления воды из этих источников влияет на колебания уровня озера и ионный состав его вод.

В табл. 5 представлены результаты исследования образцов воды озера Тшебас, отобранных в ходе экспедиций в 2015–2019 гг., а также литературные данные [25] за 2002 г., когда озеро Тшебас было еще заливом Большого Аральского моря.

Анализируя полученные данные, следует, прежде всего, отметить межгодовую изменчивость солёности его вод. В 2018 г. она была на 42% ниже, чем в 2002 г., а затем к 2019 г. повысилась на 27% вследствие понижения уровня озера почти на метр (табл. 5). Благодаря хорошей перемешанности вод озера значения солёности в поверхност-

Таблица 5. Концентрации основных ионов и другие гидрохимические параметры воды озера Тшебас в августе 2002 [25], октябре 2015 и 2018 и в сентябре 2019 гг.

Станция	Глубина м	pH	S, г/кг	ρ, г/см ³ <i>t</i> = 21°C	<i>A_T</i> , ммоль/кг	Анионы, г/кг, %			Катионы, г/кг, %				
						Cl	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	
2002													
Station V	0	8.2	81.57	Нет данных	31.65	24.20	0.43	18.10	1.20	0.75	5.25		
					38.8	29.7	0.5	22.2	1.5	0.9	6.4		
	6	8.3	83.96		32.70	24.94	0.43	18.80	1.18	0.74	5.18		
					39.0	29.7	0.5	22.4	1.4	0.9	6.2		
2015													
T1	0	7.5	79.34		1.061178	7.615	32.15	21.01	0.37	19.25	Нет данных	0.81	5.75
							40.5	26.5	0.5	24.3		1.0	7.2
2018													
T5	0	7.9	47.14	1.037440	4.558	17.70	13.65	0.24	11.23	0.57	0.76	3.00	
						37.6	29.0	0.5	23.8	1.2	1.6	6.4	
	5	8.2	47.47	1.037285	4.544	17.65	13.90	0.22	11.32	0.66	0.75	2.97	
						37.2	29.3	0.5	23.8	1.4	1.6	6.3	
2019													
T1	0	8.2	59.99	1.047259	3.867	22.08	17.52	0.21	14.99	1.16	0.68	3.34	
						36.8	29.2	0.4	25.0	1.9	1.1	5.6	
	3.4	8	59.92	1.047193	4.001	22.03	17.47	0.23	14.57	1.51	0.71	3.42	
						36.8	29.2	0.4	24.3	2.5	1.2	5.7	

Примечание. Обозначения см. табл. 3.

ном и придонном слоях были почти идентичными друг другу во время всех экспедиций.

Несмотря на значительные колебания солёности озера Тшебас, соотношения основных ионов в поверхностном и придонном слоях с течением времени менялись не очень сильно (рис. 4). По сравнению с данными [25] за 2002 г., к 2019 г. как в поверхностном, так и в придонных слоях соотношение анионов SO₄/Cl практически не изменилось, отношение HCO₃/Cl понизилось в 1.3 раза. Практическое отсутствие обеднения вод озера сульфат-ионами, а также кальцием и натрием может говорить о компенсации потерь этих ионов в результате осаждения гипса и мирабилита, за счет притока богатых сульфат-ионами вод речного происхождения при сбросах воды через Кокаральскую плотину.

Таким образом, гидрологический и гидрохимический режимы озера Тшебас существенно отличаются от режима других остаточных водоемов Аральского моря.

Залив Чернышева. Залив Чернышева Большого Аральского моря в период до 1960-х гг. был одной из самых глубоких его частей. Его максимальная глубина в 1950-х гг. составляла 40 м [3]. В августе 1992 г. максимальная глубина здесь составляла

26 м, а солёность вод залива повысилась с 10 г/кг до 32.5–33.8 г/кг [1]. В 2018 и 2019 гг. по нашим данным максимальная глубина залива была около 12.5 м. Сегодня этот водоем практически полностью отделен от основной части западного бассейна Аральского моря и соединяется с ней лишь узкой протокой, глубина которой неизвестна.

Приходную часть водного баланса залива составляют осадки (преимущественно в виде снега), воды, время от времени поступающие из Малого Арала, и подземные источники, о которых упоминалось в ранних исследованиях как о “незначительном выходе подземных вод” [3]. Считается, что именно благодаря стоку подземных вод солёность моря в заливе Чернышева в 1989 г. была меньшей, чем, в бывшем заливе Тшебас на 10.2% [1]. В настоящее время влияние подземного стока может быть более существенным из-за снижения объема залива и его замкнутости. Расходную часть водного баланса составляет, в основном, испарение и, возможно, инфильтрация в донный грунт [3].

Ионный состав вод залива Чернышева претерпел значительную метаморфизацию в результате падения уровня моря. По нашим данным, физико-химические свойства вод залива существенно

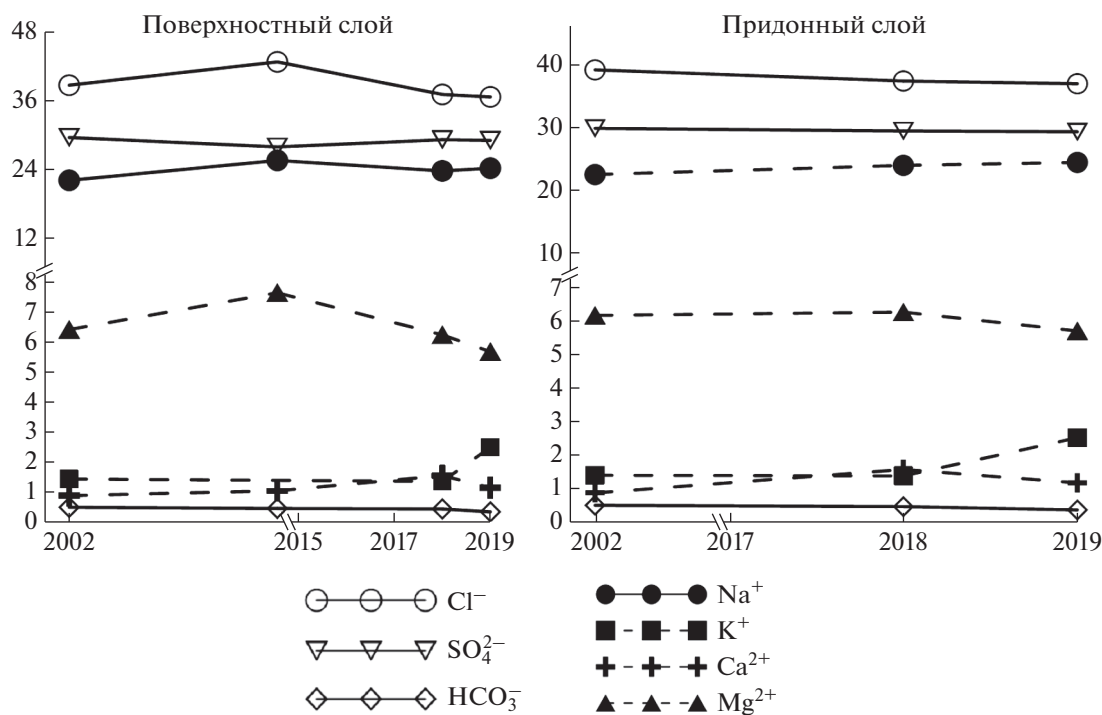


Рис. 4. Изменение основного ионного состава в воде озера Тшебас за период 2002–2019 гг., выраженное в процентах к солёности образца (по массе).

отличаются от основной части западного бассейна и от всех остальных водоемов акватории. В табл. 6 представлены концентрации основных ионов и других параметров образцов воды залива за годы исследований (2002 по данным работы [25], 2016, 2018 и 2019 гг. по данным наших экспедиций).

В отличие от Малого Арала и озера Тшебас, в которых наблюдается хорошая перемешанность вод, залив Чернышева является меромиктическим водоемом, который характеризуется наличием анокии придонного слоя с содержанием большого количества сероводорода. Присутствие сероводородного слоя в водах моря было обнаружено впервые в 2002 г. и наблюдалось до настоящего времени [6, 25, 26]. В разные годы залегание верхней границы этого слоя достигало 12–39 м при концентрациях сероводорода от 5 до 80 мг/л [5]. В августе 2002 г. галоклин в заливе располагался на глубине всего 4 м ниже поверхностного перемешанного слоя [25]. В 2014 г. эта глубина составляла 5 м [26]. По последним имеющимся данным, этот уровень опустился еще ниже до глубины 7 м (см. табл. 3). Под ним наблюдается резкое повышение солёности, плотности, общей щёлочности, понижение pH и изменение концентраций основных ионов.

Двухслойная структура залива Чернышева, с бескислородным придонным слоем представляет большой интерес для исследования. В результате

изучения физических параметров водоема с помощью натуральных измерений на заякоренных станциях и численных экспериментов в 2014 г. было обнаружено, что из-за практически полного подавления турбулентного теплообмена вследствие высокой плотностной стратификации, в придонном слое происходит сохранение тепла в теплый период года. Это тепло остается там в течение всего года. Так, например, при температуре воздуха зимой -20°C , а поверхностного слоя вод около 0°C температура придонного слоя остается $+16^{\circ}\text{C}$ [11]. Отметим, что температура является важным фактором формирования рассола, поскольку, она существенным образом влияет на растворимость минеральных фаз [24].

В результате усыхания моря в придонном слое залива Чернышева отмечается, вероятно, самая высокая для Аральского моря минерализация. В 2014 г. она составляла 134 г/кг, в 2015 г. – 244 г/кг, в 2016 году – 243 г/кг [13], в 2018 – 235 г/кг, в 2019 – 236 г/кг по нашим данным. Такая солёность придонных вод залива Чернышева близка к солёности вод Мертвого моря, которая, в северной его части, в 2017 г. составила около 297 г/кг [2]. Поверхностный же слой залива Чернышева имеет существенно меньшую солёность, за период наших наблюдений она колебалась от 72 г/кг в 2018 г до 157 г/кг в 2019 г. (табл. 6). То есть в 2019 г. солёность поверхностного слоя неожиданно повысилась в два раза по сравнению с 2018 г.

Таблица 6. Концентрации основных ионов и другие гидрохимические параметры воды Залива Чернышева в августе 2002 [25], октябре 2015 и в сентябре 2019 гг.

Точка отбора	Глубина отбора, м	pH	S, г/кг	ρ , г/см ³ $t = 21^{\circ}\text{C}$	A_T , ммоль/кг	Анионы, г/кг, %			Катионы, г/кг, %			
						Cl	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
2002												
Station IX	0	8.2	82.21	нет данных		31.31	24.27	0.41	19.30	1.07	0.75	5.10
	22	8.2	109.17			38.1	29.5	0.5	23.5	1.1	0.9	6.2
						41.97	31.97	0.51	25.70	1.41	0.70	6.93
						38.4	29.3	0.5	23.5	1.3	0.6	6.3
2016												
C5	0	7.9	81.94	1.068143	8.301	35.96	18.93	0.04	20.24	Нет данных	0.88	5.89
	12	7.2	242.74	1.213581	17.697	43.9	23.1	0.1	24.7		1.1	7.2
						89.42	72.94	0.08	65.50		0.77	14.03
						36.8	30.1	0.0	27.0		0.3	5.8
2018												
C5	0	8.1	71.61	1.059920	6.551	33.40	15.29	0.28	17.33	1.06	0.94	5.31
	12	7.2	234.87	1.204784	16.310	46.6	21.4	0.4	24.2	1.5	1.3	7.4
						86.84	68.61	0.75	62.93	2.25	0.54	12.96
						36.97	29.21	0.32	26.79	0.96	0.23	5.52
2019												
C5	0	7.9	156.74	Нет данных	9.594	72.46	30.68	0.44	39.73	2.23	0.53	10.68
	12.4	7.3	236.36	1.199779	13.959	46.2	19.6	0.3	25.3	1.4	0.3	6.8
						85.72	70.08	0.85	63.77	3.26	0.40	12.29
						36.3	29.7	0.4	27.0	1.4	0.2	5.2

Примечание. Обозначения см. табл. 3.

Соленость придонного слоя лишь в 1.5 раза больше поверхностного.

Содержание сульфат-ионов, а также ионов кальция и магния в поверхностном и придонном слоях стабильно уменьшается со временем (рис. 5), вероятно, в результате выпадения их в виде гипса, и, возможно, ангидрита, эпсомита, и других солей кальция и магния. Содержание сульфатов в воде за период с 2002 по 2019 гг. понизилось в основном в поверхностном слое. Так соотношение SO_4/Cl в поверхностном слое уменьшилось в 1.8 раз, а в придонном — лишь в 1.1 раз. По нашим наблюдениям содержание сульфатов в придонном слое остается относительно стабильным. В период с 2002 по 2019 гг. SO_4/Cl находилось в пределах 0.76–0.82. Эта стабильность, возможно, связана с вторичным восстановлением сульфат-иона из осадка, образованного солями кальция натрия и магния [19], а также из органических остатков. Ранее проведенные исследования показали, что поступление сульфатов из осадка в 2002 г. составляло в день около 1143 г/м² в заливе Чернышева, в заливе Тшебас — 228 г/м² и в Малом Арале —

33.5 г/м² [25]. Известно, что при испарении поступающие воды обычно достигают перенасыщения и осадения сначала в отношении щелочно-земельных карбонатов, затем — гипса, магнезита и сульфатов магния и натрия [6, 24].

Соотношение HCO_3/Cl за этот период понизилось в 2 раза на поверхности и в 1.2 раза в придонном слое, Ca/Cl — понизилось в 3 раза на поверхности и в придонном слое, Na/Cl — не изменилось на поверхности и повысилось в 1.2 раза в придонном слое, Mg/Cl — практически не изменилось во всех слоях, а K/Cl — не изменилось в поверхностном, но увеличилось в 1.3 раза в придонном слое. Ионы калия, как известно, выпадают из рассола в последнюю очередь, когда он достигает состояния рапы [4, 19].

Полученные данные позволяют проследить механизмы формирования и метаморфизации вод соленого озера данного типа и процессы осадкообразования в нем.

Исследование плотности образцов воды Аральского моря. На основании результатов исследования плотности образцов воды построили график,

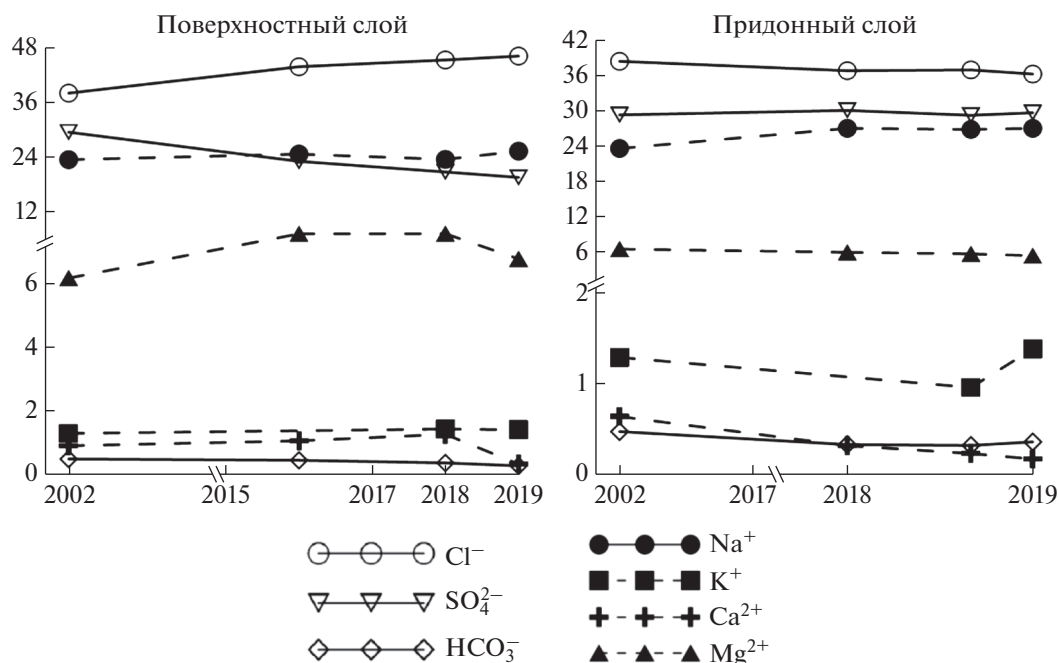


Рис. 5. Изменение (% по массе) ионов основного состава в воде залива Чернышева в период 2002–2019 гг.

на котором отражается взаимозависимость физико-химических свойств воды Аральского моря и их изменение со временем (рис. 6). Экстраполяция полученных нами зависимостей плотности от солености для двух гипергалинных (озера Тшебас, залива Чернышева) и одного слабосоленого водоемов (Малого Аральского моря) выявила различия этих зависимостей для вод разного ионного состава (рис. 6). Видно, что при достижении озером Тшебас максимальной солености залива Чернышева (около 242 г/кг) отклонение между значениями плотности составило бы 0.03 г/см³ или 30 кг/м³, а в случае с Малым Аралом 0.07 г/см³ или 70 кг/м³.

Исследование плотности образцов при температуре 21°C, отобранных в период с 2015 по 2019 гг. и последующие расчеты показали, что в Малом Арале изменение солености на 1 г/кг влечет за собой изменение плотности на от 0.3 до 1×10^{-3} г/см³, в озере Тшебас — от 0.7 до 0.8×10^{-3} г/см³, а в заливе Чернышева Большого Арала — от 0.9 до 2×10^{-3} г/см³.

Плотность морской воды зависит от термического расширения (α), соленостного сжатия (β) и давления. Взаимосвязь этих характеристик выражается уравнением состояния морской воды. Знание термического расширения и соленостного сжатия необходимо для исследования явлений с изменением плотности воды (распространение звука, колебания уровня водоема, формирование вертикальной устойчивости вод и т.д.). Коэффициент β отражает влияние на плотность воды со-

держания растворенных веществ [15]. В табл. 7 приведены коэффициенты соленостного сжатия для вод отдельных водоемов Аральского моря с концентрациями солей от 10 до 243 г/кг, а для сравнения для воды Мирового океана, рассчитанные по формуле 1 из [10, 31]:

$$\beta = \frac{1}{\rho_1} \left(\frac{\partial \rho}{\partial S} \right) = \frac{1}{\rho_1} (\rho_2 - \rho_1 / S_2 - S_1), \quad (1)$$

где β — коэффициент соленостного сжатия г/кг, ρ_1 — плотность образца воды с меньшим значением, ρ_2 — плотность образца воды с большим значением, S_1 — соленость образца воды с меньшим значением, S_2 — соленость образца воды с большим значением. Значения ρ_1 , ρ_2 выражены в г/см³, значения S_1 , S_2 выражены в г/кг.

Плотность океанической воды с минерализацией 35, 30, 25, 20, 15, 10 и 5 г/кг была рассчитана при атмосферном давлении и температуре 21°C по уравнению UNESCO EOS-80*. Результаты расчетов коэффициентов представлены в табл. 7.

Из данных приведенных в табл. 7 видны существенные различия коэффициентов как между водоемами, так и со стандартной морской водой. Различия существуют и внутри отдельного бассейна. При этом отличный от океанской воды ионный состав вод Аральского моря приводит как к занижению значений коэффициентов β , так и к завышению их по сравнению со значениями β в СМВ. Эти исследования лишней раз доказывают, что применение существующего уравнения состояния для исследования плотности воды

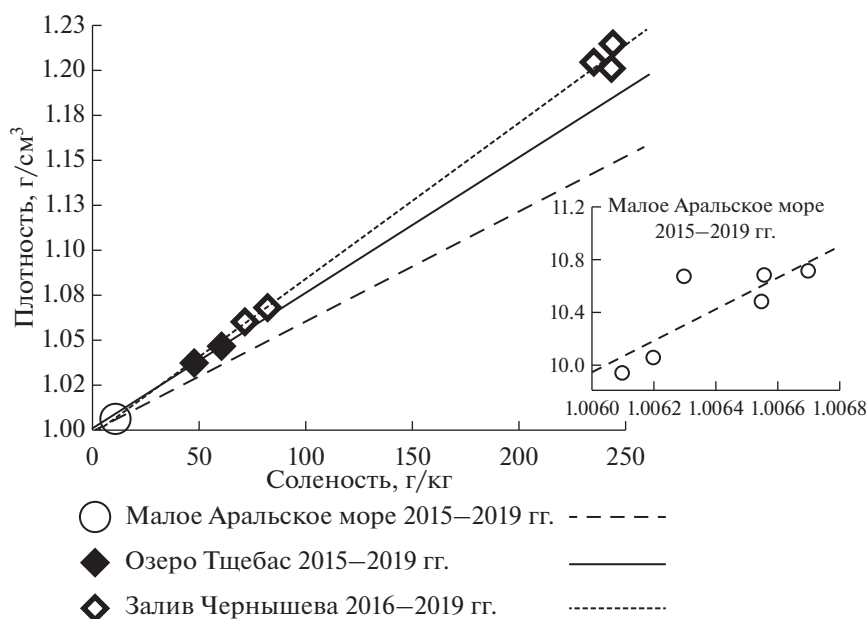


Рис. 6. Зависимости плотности от солености воды при температуре 21°C в Малом Арале, озере Тшебас и заливе Чернышева Большого Аральского моря в 2015–2019 гг.

Аральского моря не возможно. Представить какое-либо общее уравнение для всех водоемов Бывшего Аральского моря или даже для одного озера также не возможно из-за разницы ионного состава, как между водоемами, так и внутри одного водоема.

Таблица 7. Коэффициенты соленостного сжатия β рассчитанные для образцов вод отдельных водоемов Аральского моря и стандартной морской воды IAPSO (CMB)

S_1	Аральское море 2015–2019 гг.	
г/кг	глубина, м	$\beta \times 10^{-3}$, г/кг
Малый Арал		
10.21	0	0.31
10.48	12	0.39
Озеро Тшебас		
47.14	0	0.74
59.90	0	0.69
47.47	3–4	0.77
Залив Чернышева		
73.61	0	0.88
82.38	0	0.90
234.87	12	0.83
Океаническая вода		
30	—	0.75
25	—	0.75
20	—	0.75
15	—	0.75
10	—	0.75

Река Сырдарья. Гидролого-гидрохимический режим Сырдарьи менялся на протяжении десятилетий и меняется в настоящее время [29]. В настоящее время максимальные расходы воды в среднем течении Сырдарьи стали формироваться в зимне-весенний, а не в вегетационный период, что было характерно для естественного режима реки [12]. Причиной тому послужил переход эксплуатации ряда водохранилищ на энергетический режим и повышение расхода воды из водохранилищ в зимний период.

В верховьях воды реки и ее притоков относятся к категории бикарбонатно-кальциевых. Ионный состав этих вод, в основном, определяется растворением карбонатов и выветриванием силикатов [29]. По данным работы [12] в р. Сырдарья ежегодно смыывается 20 млн. тонн солей с коллекторно-дренажными возвратными водами с полей. В современных условиях общий объем коллекторно-дренажных вод в бассейне р. Сырдарья достиг 22.4 км³/год. Из них 14.1 км³/год сбрасывается обратно в реки, а 5.5 км³/год отводится в естественные понижения и пески, а остальное теряется на испарение и инфильтрацию.

Уже давно в водах реки наблюдается превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) основных ионов [12]. Для питьевой воды открытых водоемов ПДК хлоридов составляет 350 мг/л, сульфатов — 500 мг/л, магния — 40 мг/л, натрия — 120 мг/л. Как отмечалось ранее, среднегодовые содержания концентраций сульфатов и магния постоянно превышают ПДК в 2–6 раз на всем протяжении реки Сырдарья, в отличие от хлоридов и ионов натрия [12]. Система ПДК для водое-

Таблица 8. Концентрации основных ионов реки Сырдарья в 2016, 2018 и 2019 гг.

Глубина отбора, м	рН	S, г/кг	ρ, г/см ³ <i>t</i> = 21°C	<i>A</i> _{<i>T</i>} , ммоль/кг	Анионы, г/кг, %			Катионы, г/кг, %			
					Cl	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
2015											
0	7.4	1.256	0.999427	2.229	0.14 <i>10.8</i>	0.64 <i>51.0</i>	0.13 <i>10.6</i>	0.11 <i>9.1</i>	0.01 <i>0.8</i>	0.13 <i>10.7</i>	0.09 <i>7.2</i>
2018											
0	7.8	1.560	0.999548	2.596	0.14 <i>9.0</i>	0.82 <i>52.8</i>	0.16 <i>10.1</i>	0.18 <i>11.7</i>	0.01 <i>0.8</i>	0.15 <i>9.5</i>	0.10 <i>6.3</i>
2019											
0	7.1	1.251	0.999160	2.172	0.11 <i>8.5</i>	0.64 <i>51.2</i>	0.15 <i>11.6</i>	0.16 <i>12.4</i>	0.02 <i>1.6</i>	0.11 <i>9.1</i>	0.07 <i>5.6</i>

Примечание. Обозначения см. табл. 3.

мов рыбохозяйственного использования предъявляет наиболее жесткие требования к качеству воды и в настоящее время находится значительно ближе к экологическим требованиям, чем гигиенические ПДК. Из наших данных (табл. 8) видно, что в 2019 году наблюдались превышения ПДК в воде реки для сульфатов на 140 мг/л, для магния — на 30 мг/л, для натрия — на 35 мг/л. В 2016 и 2018 гг. также наблюдались превышения ПДК некоторых компонентов основного ионного состава и солености в целом (табл. 8). Из ранее проведенных исследований известно, что в районах впадения коллекторов качество воды Сырдарьи в ряде случаев переходило из разряда умеренно загрязненных в загрязненные [1, 12]. К загрязнителям реки относятся соли основных ионов, ядохимикаты, дефолианты, химические удобрения, токсические органические соединения и тяжелые металлы. Это повышает минерализацию воды в Сырдарье от 149.9–452.9 мг/л в верховьях реки на территории Кыргызстана [29] и до 3000 мг/л в низовьях Ферганской долины [12]. В течение года минерализация Сырдарьи изменяется. Местами она составляет от 500–950 мг/л в половодье и до 960–2000 мг/л в межень [12].

Значительный вклад в суммарный ионный состав речной воды вносит сток сульфатов, который составлял в 1960-х гг. 29% при средней минерализации воды 0.54 г/кг, а в конце 1980-х гг. 20 века он был уже около 50% [1]. С 1980-х гг. наблюдаются изменения ионного состава речной воды и переход от гидрокарбонатно-кальциевого типа к сульфатно-натриевому. За время наблюдений в период 1981–1985 гг. значение минерализации реки составляло в среднем 1.84 г/кг [5]. Результаты наших исследований гидрохимических характеристик реки Сырдарьи за 2016, 2018 и 2019 гг. представлены в табл. 8. За три года наших наблюдений концентрация сульфатов составляла

52% от общей солености образца при общей минерализации речной воды 1.25–1.57 г/кг.

Сток реки Сырдарьи является, на сегодняшний день, основным приходным компонентом водного баланса Малого Аральского моря. Поэтому от объема, минерализации и состава речной воды напрямую зависит состав воды Малого моря, его экологическое состояние и биоразнообразие.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспедиций 2015–2019 гг. получены новые данные гидрохимических характеристик вод отдельных водоемов Аральского моря: залива Чернышева, залива Тшебас и Малого Аральского моря, а также реки Сырдарьи. Установлено, что в ходе эволюции вод Аральского моря в процессе его усыхания произошли существенные изменения концентраций основных ионов, солености, плотности и других параметров вод остаточных водоемов. Эти изменения наблюдаются как между водоемами, так и внутри одного водоема по глубине (залив Чернышева).

Определена соленость образцов воды отдельных водоемов Аральского моря в виде суммы катионов и анионов. Измерение солености стандартным гидрофизическим оборудованием по электропроводности приводит к значительным ошибкам из-за отличного от океанического соотношения ионов.

Метаморфизация ионного состава вод отдельных водоемов продолжается до настоящего времени и влечет за собой изменения физических свойств воды, таких как плотность, соленость, а также влияет на нормы испарения и температуру замерзания воды.

Обнаружено, что, несмотря на восстановление солёности вод Малого Аральского моря до 10–11 г/кг, которая была характерна для периода до начала высыхания моря, ионный состав этого водоема не стал прежним. Содержание сульфатов и гидрокарбонатов возросло. Оценка влияния стока реки Сырдарья на формирование состава вод Малого Аральского моря позволяет предположить, что повышение сульфатов в воде моря от года к году связано с их поступлением с речным стоком. Ожидается, что при существующих гидрологических условиях повышение сульфатов и некоторых других ионов будет продолжаться, и, вероятно, приведет к дальнейшему изменению ионного состава этого водоема.

В озере Тщebas несмотря на заметные колебания его уровня и солёности соотношение основных ионов в воде остается близким к постоянному. Так, в 2019 г. в результате снижения уровня этого озера почти на 1 м по сравнению с 2018 г. солёность повысилась на 21%, но соотношение основных ионов практически не изменилось. И наоборот, изменения солёности и стратификации в заливе Чернышева сопровождались выраженным изменением соотношения основных ионов.

Анализ вод реки Сырдарья выявил превышение предельно допустимых значений солёности (1 г/кг) в 2015 г. — на 0.38 г/кг, в 2018 г. — на 0.57 г/кг, и в 2019 г. — на 0.25 г/кг, а также превышение ПДК сульфатов и некоторых других ионов.

Источники финансирования. Исследования были выполнены в рамках темы Госзадания № 0149-2019-0003 (анализ данных), при частичной поддержке Минобрнауки РФ (Соглашение № 14.W03.31.0006 (отбор проб) и гранта РФФИ и DFG в рамках научного проекта № 20-55-12007 (лабораторные измерения). Авторы благодарят всех участников аральских экспедиций за отбор и доставку проб воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амиргалиев Н.А. Арало-Сырдарьинский бассейн: (гидрохимия, проблемы водной токсикологии). Алматы: ТОО Издательский Дом Бастау, 2007. 224 с.
2. Андрулионис Н.Ю., Завьялов П.О. Лабораторные исследования основного компонентного состава гипергалинных озер // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35. № 1. С. 16–36.
3. Блинов Л.К. Гидрохимия Аральского моря. Л.: Гидрометеиздат, 1956. 233 с.
4. Валяшко М.Г. Закономерности формирования месторождений калийных солей. М.: Изд. Моск. университета, 1962. 398 с.
5. 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.

6. 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.
7. ГОСТ 23268.7-78. Воды минеральные питьевые лечебные, лечебно-столовые и природные столовые. Методы определения ионов калия. Введ. 1980-01-01. М.: ИПК Изд. станд., 2003. 4 с.
8. ГОСТ 17.1.5.04-81. Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Приборы и устройства для отбора, первичной обработки и хранения проб природных вод. Общие технические условия. Введ. 1984-01-01. Актуал. 2019-01-01. М.: ИПК Изд. станд., 2003. 7 с.
9. ГОСТ 17.1.5.05-85 Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков. Введ. 1986-07-01. М.: ИПК Изд. станд., 2003. 12 с.
10. Доронин Ю.П. Физика океана. СПб.: РГГУ, 2000. 339 с.
11. Ижицкий А.С., Кириллин Г.Б., Завьялов П.О. Аральское море как природный “солнечный пруд”: экстремальные условия температуры и перемешивания // Сборник трудов Международного симпозиума “Мезомасштабные и субмезомасштабные процессы в гидросфере и атмосфере”. М.: ИО РАН, 2018. С. 162–164.
12. Качество воды в бассейнах рек Амударья и Сырдарья. Аналитический отчет. Ташкент, 2011, <http://www.cawater-info.net/aryl/figures.htm>
13. Маккавеев П.Н., Стунжас П.А. Об измерениях солёности гипергалинных рассолов на примере современного Аральского моря // Океанология. 2017. Т. 57. № 6. С. 990-996.
14. Минералы Узбекистана. Гл. ред. С.Т. Бадалов. — Том II. Ташкент: Изд-во “Фан” УзССР, 1975. — 335 с.
15. Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. Гидрология. М.: Высшая школа, 2007. 463 с.
16. Руководство по химическому анализу морских вод. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 265 с.
17. Общая щёлочность морской воды. Методика измерений титриметрическим методом. М.: ФГУ ГОИН, 2010. 20 с.
18. Руководство по эксплуатации DMA 4100 M, DMA 4500 M, DMA 5000 M. // Версия программного обеспечения: V1.70. Номер документа: C76IB01F.fm. Дата: 15 января 2010 г. Опубликовано Anton Paar. Грац: Anton Paar GmbH, Австрия Copyright, 2010. 135.
19. Сонненфелд П. Рассолы и эвапориты. М.: Мир, 1988. 475 с.
20. Стародубцев В. М., Богданец В. А. О формировании почвенного покрова на осушенном дне Аральского моря // Проблемы освоения пустынь. 2007. № 3. С. 34–40.
21. Aladin N., Chida T., Cretaux J.-F. et al. Current status of lake Aral — challenges and future opportunities // PROCEEDINGS of the 16th World Lake Conference “Lake Ecosystem Health and Its Resilience: Diversity and Risks of Extinction”. Bali, Indonesia, 2017. P. 448–457.

22. *Andrulionis N., Zavialov I., Kovaleva E. et al.* Site-Specific equation of state for coastal sea areas and inland water bodies // Materials of XXVI international coastal conference "Managing risks to coastal regions and communities in a changing world" St. Petersburg, 2016.
23. *Culkin F., Cox R.A.* Sodium, potassium, magnesium, calcium and strontium in seawater// Deep-Sea Research. 1966. V. 13. P. 789–804.
24. *Jones B.F., Deocampo D.M.* Geochemistry of saline lakes // Treatise on Geochemistry. 2003. V. 5 P. 393–424.
25. *Friedrich J., Oberhansli H.* Hydrochemical properties of the Aral Sea water in summer 2002 // Journal of Marine Systems. 2004. V. 47. P. 77–88.
26. *Izhitskiy A.S., Zavialov P.O., Sapozhnikov P.V. et al.* Present state of the Aral Sea: diverging physical and biological characteristics of the residual basins // Scientific Reports. 2016. V. 6: 23906.
27. *The Aral Sea Environment / Kostianoy A., Kosarev N. (Eds.).* Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2010. 332 p.
28. *Kremling K.* Determination of the major constituents // In: *Grasshoff K. (Eds.) Methods of Seawater Analysis.* Weinheim: WILEY-VCH, 2007. P. 229–251.
29. *Ma L., Abuduwaili J., Li Y. et al.* Hydrochemical Characteristics and Water Quality Assessment for the Upper Reaches of Syr Darya River in Aral Sea Basin, Central Asia // Water. 2019. V.11. P. 1893.
30. *Micklin P.* Efforts to Revive the Aral Sea // The Aral Sea. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. P. 361–380.
31. *Millero F.J.* Chemical Oceanography. 4th Edition. CRC Press, 2013. 591 p.
32. *Millero F.J., Feistel R., Wright D. et al.* The composition of Standard Seawater and the definition of the Reference-Composition Salinity Scale // Deep Sea Res. Part I: Oceanographic Research Papers. 2008. V. 55. № 1. P. 50–72.
33. *Indoitu R., Kozhoridze G., Batyrbaeva M. et al.* Dust emission and environmental changes in the dried bottom of the Aral Sea // Aeolian Research. 2015. V. 17. P. 101–115.
34. *White K.* Nature and Economy in the Aral Sea Basin // The Aral Sea. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. P. 301–335.
35. *Zavialov P.O., Ni A.A., Kudyshekin T.V. et al.* Ongoing changes of ionic composition and dissolved gases in the Aral Sea // Aquatic geochemistry. 2009. V. 15. P. 263–275.
36. *Zavialov P.O.* Physical Oceanography of the Dying Aral Sea. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 146 p.

Modern Evolution of the Salt Composition of the Residual Basins of the Aral Sea

N. Yu. Andrulionis^{a, #}, P. O. Zavyalov^{a, ##}, A. S. Izhitskiy^{a, ###}

^a*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: natalya@ocean.ru*

^{##}*e-mail: peter@ocean.ru*

^{###}*e-mail: izh@ocean.ru*

New hydrochemical data from the residual water bodies of the Aral Sea situated in Kazakhstan (Small Aral, Chernyshev Bay, and the newly separate former Tshchebas bay) were collected in field surveys of 2015, 2016, 2018 and 2019. Comparison of the recently obtained data with historical records points to the continuing evolution of the salt composition of the Aral Sea waters. These processes follow different paths in different residual lakes and significantly affect the physical properties of their waters, such as density, salinity, freezing point, and evaporation rates. We report an increase in the concentration of sulfates in the Small Aral and evaluate the influence of the Syrdarya river runoff on the ionic salt composition of the lake's waters. In the meromictic Chernyshev Bay, a strong weakening of water stratification by more than two times was observed in 2018–2019, which was accompanied by a change in the ratios between the contents of the principal ions. For Lake Tshchebas, on the contrary, the ionic composition remained practically constant, despite significant interannual fluctuations in the level and salinity of its water.

Keywords: ionic composition, hyperhaline reservoir, Aral Sea, salt lakes, Chernyshev Bay, Tshchebas Lake, Small Aral Sea, Syrdarya River