

УДК 551.465

## СОВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СОЛЕВОГО СОСТАВА ВОД ЗАПАДНОГО БАСЕЙНА БОЛЬШОГО АРАЛЬСКОГО МОРЯ

© 2021 г. Н. Ю. Андрулионис<sup>1</sup>, \*, П. О. Завьялов<sup>1</sup>, \*\*, А. С. Ижицкий<sup>1</sup>, \*\*\*<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

\*e-mail: natalya@ocean.ru

\*\*e-mail: peter@ocean.ru

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

Поступила в редакцию 07.12.2020 г.

После доработки 19.01.2021 г.

Принята к публикации 08.04.2021 г.

В ходе экспедиции в 2019 г. были проведены гидрохимические исследования западного бассейна Большого Аральского моря (на территории Узбекистана). Образцы воды были отобраны в глубоководной части западного бассейна с различных горизонтов. Максимальная глубина озера на момент отбора проб составляла 30 м. Данная работа является частью исследований эволюции вод остаточных водоемов Аральского моря. Она описывает эволюцию химического состава аральской воды, наблюдаемую в озере со времени начала его усыхания и продолжающуюся по настоящее время во всех остаточных водоемах Аральского моря. Установлено, что глубоководная часть западного бассейна Большого Арала в настоящее время имеет соленость около 140 г/кг и занимает промежуточное положение между слабосоленым Малым Аральским морем и гипергалинным заливом Чернышева Большого Арала. Соленость озера повышается с каждым годом и имеет сезонные изменения наряду с колебаниями уровня озера. Обнаружено, что при увеличении солености на каждый 1 г/кг плотность повышается на  $1.2 \text{ кг/м}^3$ , как в поверхностном, так и в придонном слоях.

**Ключевые слова:** эволюция состава воды, основной ионный состав, компонентный состав, метаморфизация вод, гипергалинный водоем, Аральское море, соленые озера, Большой Арал, гидрохимические свойства

DOI: 10.31857/S0030157421060034

### ВВЕДЕНИЕ

Гидрохимические параметры являются важными показателями состояния водоема. Исследование гидрохимических характеристик Аральского моря позволяет понять механизмы образования рассолов, эвапоритов и осадков в гипергалинных озерах данного типа, а также прогнозировать состояния соленых озер в зависимости от изменений окружающей среды.

Гидрохимический режим Аральского моря, как и любого другого бассейна, тесно связан с его физико-географическим положением. На него влияют география, геология, климатология, динамика вод, материковый сток и другие факторы [18, 29]. В последние несколько десятков лет на минеральный состав вод Аральского моря влияют региональные изменения окружающей среды. Аральское море образовалось более 10 тыс. лет назад и в середине XX в. вплоть до 1960-х гг. было четвертым по площади внутриматериковым водоемом. Это замкнутое бессточное озеро располагается в засушливой зоне с семиаридным кли-

матом и с индексом аридности (IM — moisture index) 0.07 в существующем диапазоне для аридных районов 0.05–0.2 [9]. Об истории возникновения отдельных водоемов Аральского моря мы сообщаем в нашей статье [3]. Кратко можно отметить, что уровень моря до 1960-х гг. колебался около отметки 53.5 м над уровнем Мирового океана [6], в 2004 г. он понизился до 30 м [35], к 2010 г. — до 26 м [10]. В 2019 г. по нашим расчетам он составлял около 18 м над уровнем Мирового океана. К настоящему времени уровень моря снизился на 36 м или на 56%.

Максимальная глубина моря в самой глубокой его части (станция А2) до 1960-х гг. была по разным данным 66–68 м [6, 10]. В 2000 г. она составила 46.5 м [35], в 2014 г. — 34 м, в 2015 г. — 32.6 м [28], в октябре 2017 г. — 29.5 [4]. На сегодняшний день западный бассейн Большого Аральского моря представляет собой самый глубокий из оставшихся отдельных водоемов. По нашим данным в мае 2019 г. его глубина составила 30 м. Северная оконечность Большого моря, залив Чернышева, превратилась в почти изолированный водоем, хотя

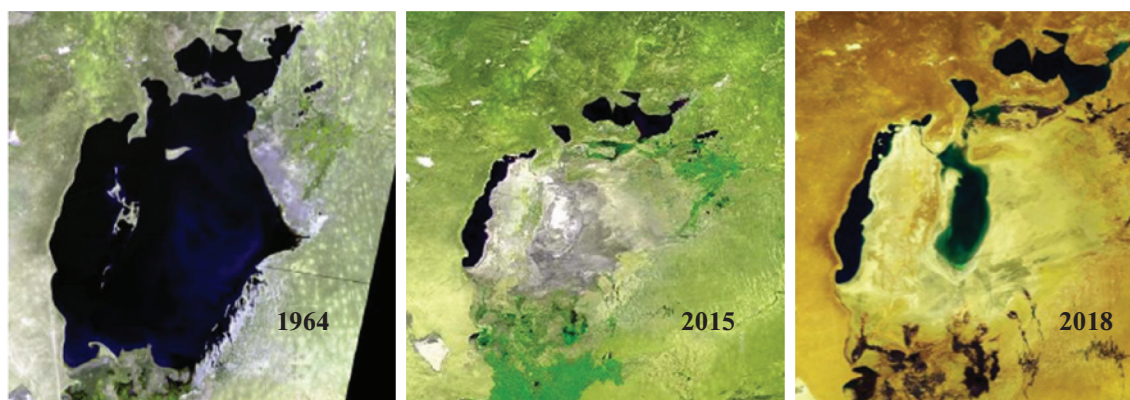


Рис. 1. Спутниковые снимки состояния Аральского моря в 1964 г. [24], 2015 г. и 2018 г. [25].

до сих пор соединяется протокой с основной частью бассейна.

Средняя соленость вод моря в период с 1949 по 1960 гг. составляла 9,0–10,8 г/кг [10]. Ее повышение в западном бассейне Большого Арала в период с 1960 по 2010 гг. происходило с разной интенсивностью — от 2 до 14 г/кг в год, а в среднем на 7 г/кг. В период с 2014 по 2017 гг. соленость составила 126–140 г/кг на поверхности [4].

Сокращение площади моря привело к образованию пустынных участков вокруг водоема — плайя. Такие плайя образуются вследствие сокращения озер и их высыхания. В настоящее время в Центральной Азии плайя занимают более 60 000 км<sup>2</sup>. Площадь плайя Аральского моря превышает 30 000 км<sup>2</sup>. Они способствуют появлению и усилению солевых и пылевых бурь, негативно влияющих на экологию и здоровье населения в регионе [19, 20, 32, 33]. Бури поднимают отложения на осушенном дне Аральского моря, представленные осажденными частицами, которые содержат много сульфатов, хлоридов, пестицидов, тяжелых металлов и других элементов, принесенных когда-то реками в озеро [23, 26]. Масштаб пылевых выносов с обсохшего дна Аральского моря оценивается разными авторами величиной от 15 до 75 млн т в год и более [19]. Остаточные озера, в свою очередь, являются точками отлова некоторого количества пылевых частиц, тем самым сокращая негативное влияние пылевых и песчаных бурь на окружающую среду [30]. Дегградация моря давно вызывает научный интерес, и об этих исследованиях написано более 1000 публикаций. Последствиями высыхания Аральского моря стали: изменение климата в Приаралье, упадок экономики, рыболовства, катастрофическое снижение биоразнообразия природных экосистем самого моря и дельтовых районов рек, а также увеличение частоты и силы солевых и пылевых бурь [23, 26].

Усыхание моря вызвало повышение минерализации воды и изменение соотношений компонентов ее химического состава. Причины усыхания Аральского моря, как предполагается, на 80% имеют антропогенный характер, а на 20% — климатический, связанный с общим усилением засушливости во всей Средней Азии [11, 14]. Район Аральского моря характеризуется повышенной изменчивостью индекса IM. Некоторые исследователи считают, что климатический фактор здесь играет решающую роль. В работе [9] это объясняется “внутриматериковой сухой фазой климата”, которая обострила процессы опустынивания в Аральском регионе в XX в., наряду с антропогенным воздействием.

Усыхание моря привело к изменению морфометрических характеристик вод Арала. Результатом его стали глубокие преобразования гидрологического, физического и химического режимов в его отдельных частях [8]. На рис. 1 представлены спутниковые снимки, наглядно демонстрирующие изменения площади Аральского моря в результате его усыхания с 1964 по 2018 гг.

Целью настоящей работы было проведение гидрохимических исследований самой большой и глубокой части Аральского моря. Результаты исследований западного и восточного бассейнов Большого Арала за более ранние периоды описаны в наших работах [10, 34]. Были определены концентрации основных ионов, соленость, общая щелочность, pH, плотность воды в образцах вод исследуемого водоема, а также выявлена взаимосвязь этих параметров.

Отдельной задачей явилось сравнение полученных данных с историческими и изучение эволюции ионного состава вод Аральского моря в изменяющихся гидрологических условиях. На примере данных полученных в экспедиции 2019 г. мы проанализировали распределение компонентов основного ионного состава по глубине от 0 до 30 м.

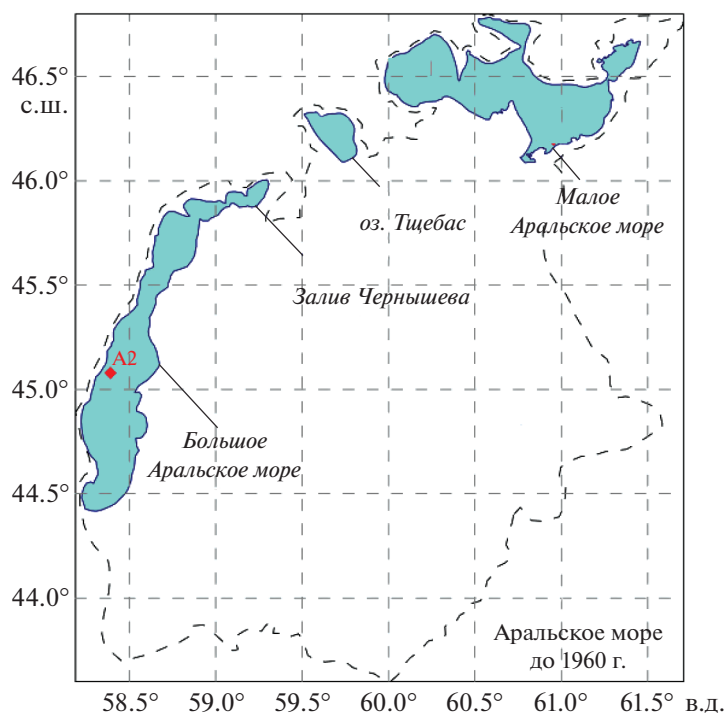


Рис. 2. Схема современного Аральского моря и расположение станции отбора проб А2.

## МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Исследование воды проводили в самой глубоководной части западного бассейна Большого Аральского моря на станции А2, где сотрудниками ИО РАН регулярно проводятся гидрохимические и гидрофизические исследования. Местоположение ст. А2 представлено на рис. 2, а ее координаты в табл. 1. В таблице также приведены координаты станций отбора проб в период с 2014 по 2017 гг. Результаты этих исследований были опубликованы ранее в нашей работе [4].

В герметично упакованной пластиковой таре пробы воды Аральского моря в течение 3–7 дней доставили в лабораторию для анализа. Отбор и хранение проб осуществляли в соответствии со стандартами [9].

Общую щелочность ( $A_T$ ) определяли методом кислотно-основного титрования согласно [15, 16].

После определения pH и общей щелочности пробы фильтровали через мембранный фильтр GFF 0.7 мкм и помещали в стеклянные емкости объемом 100–250 мл. Хлорность и концентрации основных ионов (сульфата, кальция и магния) устанавливали методом потенциометрического титрования. Для этого использовали автоматический потенциометрический титратор Metrohm 905 Titrando, с индикаторными электродами, подбираемыми в соответствии с типом протекающей реакции и определяемым ионом. В статье [4] подробно описаны методы определения концентраций основных ионов в гипергалинных водоемах. Среднеквадратичные отклонения концентраций исследуемых ионов не превышали значений, представленных в табл. 2. Анализ каждой пробы проводили 3–6 раз в зависимости от определяемого иона. Концентрации ионов калия определяли гравиметрически. Концентрации ионов на-

Таблица 1. Координаты станций отбора проб воды в западном бассейне Большого Аральского моря в 2014–2019 гг.

Название станции	Макс. глубина в точке отбора проб, м	Глубина отбора проб, м	Год отбора проб	Месяц отбора проб	Координаты
А2	34.1	34	2014	Октябрь	45°4'46.1" с.ш. 58°23'25.1" в.д.
	29.2	29	2017	Октябрь	
	30.1	30	2019	Май	
У берега	0.5	0	2016	Апрель	45°5'37.13" с.ш.
			2017	Октябрь	58°20'22.94" в.д.

**Таблица 2.** Среднеквадратичные отклонения определяемых гидрохимических параметров воды западного бассейна Аральского моря в 2019 г., в г/кг и % от среднего значения

Глубина м	Ca <sup>2+</sup>		Mg <sup>2+</sup>		K <sup>+</sup>		Cl <sup>-</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		pH		A <sub>T</sub>	
	г/кг	%	г/кг	%	г/кг	%	г/кг	%	г/кг	%	г/кг	%		%	ммоль/кг	%
0	0.02	3.0	0.02	0.2	0.05	2.1	0.28	0.4	0.08	0.4	0.005	1.1	0.01	0.1	0.24	2.0
15	0.03	4.1	0.03	0.2	0.04	1.7	0.08	0.1	0.05	0.2	0.001	0.2	0.03	0.4	0.07	0.6
25	0.01	1.7	0.05	0.5	0.05	1.9	0.41	0.6	0.05	0.2	0.002	0.4	0.01	0.2	0.22	1.9
30	0.04	5.3	0.02	0.2	0.02	0.8	0.14	0.2	0.16	0.7	0.014	3.1	0.04	0.5	0.18	1.9

трия определяли как разницу между анионами и катионами в моль/кг и пересчитывали в г/кг.

Оптимальный объем образца для каждого анализа определялся опытным путем в зависимости от определяемого иона. В ходе измерения при необходимости пробы разбавляли деионизированной водой с электропроводностью не более 0.2 мкС/см, приготовленной с помощью лабораторного деионизатора.

Общий растворенный неорганический углерод рассчитывали из общей щелочности и выражали как HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> [31]. Соленость исследуемых образцов была определена суммированием содержаний основных ионов. Определение солености вод гипергалинных водоемов при помощи стандартного гидрофизического измерительного оборудования приводит к большим погрешностям вследствие отличия их ионно-солевого состава от “канонического” океанского [6, 8, 21]. Соленостью морской воды считается сумма всех минеральных веществ, растворенных в 1 кг морской воды, при условии, что весь бром замещен эквивалентным количеством хлора, все карбонаты переведены в окиси, а все органические вещества удалены [6, 31]. Поэтому способ суммирования концентраций основных ионов можно считать наиболее достоверным для определения солености, особенно в водоемах с ионным составом, отличным от океанского. Кроме того, вследствие постоянного изменения соотношения ионов в аральской воде расчет солености с использованием хлорного коэффициента также не может быть применен [2]. Другие способы определения солености Аральского моря, например, весовым методом (по весу сухого остатка после испарения пробы), а также методом измерения скорости звука, описаны в работе [13].

Плотность водной толщи обычно получают по расчетным данным гидрофизического STD-зонда, то есть по уравнению состояния, которое в водоемах с отличным от океанского ионно-солевым составом приводит к существенным отклонениям от реальных значений солености, а следовательно, и плотности. Измерения плотности аральской воды в нашей работе мы проводили с помощью плотномера Anton Paar DMA 5000 M. Погреш-

ность измерения плотности воды  $\pm 10^{-6}$  г/см<sup>3</sup> [17]. Плотность измерялась при температуре 21°C при атмосферном давлении. Для каждой пробы проводили 3–4 измерения. Среднеквадратичное отклонение в отдельных случаях доходило до 0.06 кг/м<sup>3</sup>, а чаще равнялось 0. За результат принимали среднее значение.

Температуру во время отбора проб в 2019 г. измеряли при помощи гидрофизического зонда CastAway CTD и Rinko CTD-Profiler.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Гидрохимические данные, полученные в результате экспедиций в Аральском море в 2019 г., в сравнении с более ранними данными за 2014–2017 гг. [4] представлены в табл. 3.

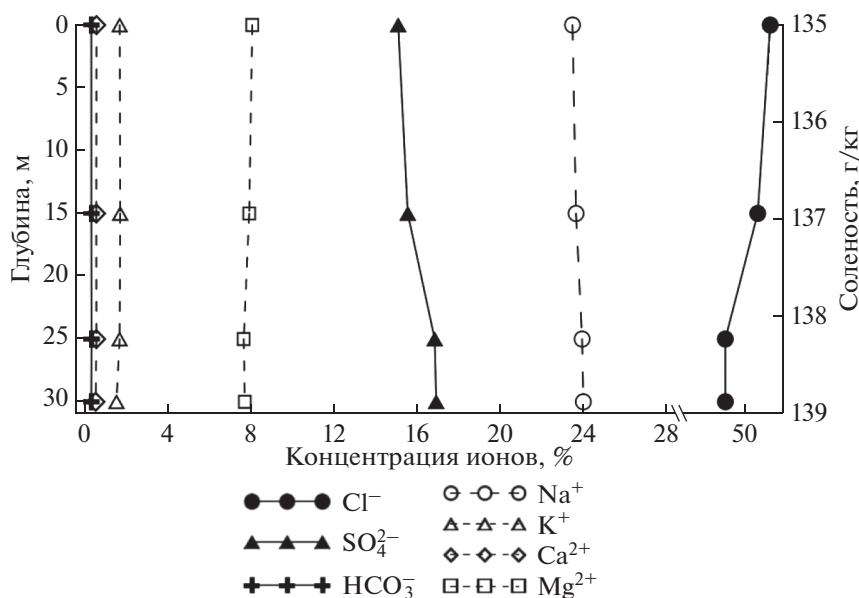
Из табл. 3 видно, что за три года в период с 2014 по 2017 гг. уровень Аральского моря в районе исследований упал на 4.8 м. Вероятнее всего, он испытывает сезонные колебания, которые можно наблюдать при сравнении значений глубин в октябре 2017 г. и в мае 2019 г. В мае 2019 г. уровень воды был почти на метр выше, чем в октябре 2017 г., а соленость на 3% меньше. Это связано, вероятно, с весенним поступлением вод материкового стока. Значения солености за период исследований с 2014 по 2019 гг. составили от 126 до 140 г/кг. Относительные соотношения основных ионов в аральской воде на протяжении этого периода колебались в зависимости от уровня водоема и его солености.

В 2019 г. массовое соотношение SO<sub>4</sub>/Cl на поверхности находилось в пределах 0.30–0.35 и 0.34–0.35 — в придонном слое. Соотношение Ca/Na было чуть меньше у дна и составило 0.023–0.025. Наблюдалось небольшое повышение содержания гидрокарбонат-ионов в придонном слое. Соотношение HCO<sub>3</sub>/Cl было 0.007 во всех образцах воды, полученных с разных горизонтов (табл. 3). Соленость в придонном слое в 2019 г. была выше, чем в поверхностном на 2.4%.

На графике (рис. 3) можно видеть распределение основных ионов в толще воды от поверхности до дна. Начиная с глубины 15 м и ниже и при солености выше 137 г/кг наблюдается изменение

Таблица 3. Гидрохимические характеристики вод западного бассейна Аральского моря (2014–2019 гг., станция А2)

Год	Станция	Глубина, м		рН	А <sub>Т</sub> <sup>**</sup> , ммоль/кг	ρ при 21°С, г/см <sup>3</sup>	S <sup>**</sup> , г/кг	Анионы, г/кг, %				Катионы, г/кг, %			
		отбора	макс. в точке отбора					Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	
2014*	А2	0	34.0	8.25	12.059	1.097569	126.30	64.1***	21.33	0.44	26.97	2.16	1.32	9.97	
		34				1.101968		50.8	16.9	0.4	21.4	1.7	1.1	7.9	
Нет данных															
2016*	У берега	0	0.5	7.94	13.428	1.104338	127.63	64.70	20.01	0.44	31.16	Нет данных	0.83	10.46	
2017*	А2	0	29.2	8.26	14.249	1.114072	140.06	68.50	23.88	0.57	33.24	2.08	0.91	10.87	
		29		8.15	13.561	1.115151	140.62	48.9	17.1	0.4	23.7	1.5	0.7	7.8	
	У берега	0	0.5	8.39	13.946	1.114072	140.22	68.60	23.75	0.66	33.40	2.09	0.95	10.78	
2019	А2	0	30.1	7.86	11.236	1.108926	135.49	69.14	20.47	0.46	31.84	2.31	0.79	10.95	
		15		7.82	10.180	1.108964	136.57	69.01	21.26	0.46	32.32	2.36	0.79	10.84	
		25		7.82	11.657	1.109927	138.68	68.27	23.39	0.48	33.22	2.35	0.80	10.64	
		30	7.83	11.688	1.111261	138.72	68.30	23.49	0.46	33.32	2.14	0.76	10.71		
Нет данных															
2019	А2	0	30.1	7.86	11.236	1.108926	135.49	69.14	20.47	0.46	31.84	2.31	0.79	10.95	
		15		7.82	10.180	1.108964	136.57	69.01	21.26	0.46	32.32	2.36	0.79	10.84	
		25		7.82	11.657	1.109927	138.68	68.27	23.39	0.48	33.22	2.35	0.80	10.64	
		30	7.83	11.688	1.111261	138.72	68.30	23.49	0.46	33.32	2.14	0.76	10.71		
Нет данных															
2019	А2	0	30.1	7.86	11.236	1.108926	135.49	69.14	20.47	0.46	31.84	2.31	0.79	10.95	
		15		7.82	10.180	1.108964	136.57	69.01	21.26	0.46	32.32	2.36	0.79	10.84	
		25		7.82	11.657	1.109927	138.68	68.27	23.39	0.48	33.22	2.35	0.80	10.64	
		30	7.83	11.688	1.111261	138.72	68.30	23.49	0.46	33.32	2.14	0.76	10.71		
Нет данных															
2019	А2	0	30.1	7.86	11.236	1.108926	135.49	69.14	20.47	0.46	31.84	2.31	0.79	10.95	
		15		7.82	10.180	1.108964	136.57	69.01	21.26	0.46	32.32	2.36	0.79	10.84	
		25		7.82	11.657	1.109927	138.68	68.27	23.39	0.48	33.22	2.35	0.80	10.64	
		30	7.83	11.688	1.111261	138.72	68.30	23.49	0.46	33.32	2.14	0.76	10.71		
Нет данных															
2019	А2	0	30.1	7.86	11.236	1.108926	135.49	69.14	20.47	0.46	31.84	2.31	0.79	10.95	
		15		7.82	10.180	1.108964	136.57	69.01	21.26	0.46	32.32	2.36	0.79	10.84	
		25		7.82	11.657	1.109927	138.68	68.27	23.39	0.48	33.22	2.35	0.80	10.64	
		30	7.83	11.688	1.111261	138.72	68.30	23.49	0.46	33.32	2.14	0.76	10.71		
Нет данных															
2019	А2	0	30.1	7.86	11.236	1.108926	135.49	69.14	20.47	0.46	31.84	2.31	0.79	10.95	
		15		7.82	10.180	1.108964	136.57	69.01	21.26	0.46	32.32	2.36	0.79	10.84	
		25		7.82	11.657	1.109927	138.68	68.27	23.39	0.48	33.22	2.35	0.80	10.64	
		30	7.83	11.688	1.111261	138.72	68.30	23.49	0.46	33.32	2.14	0.76	10.71		
Нет данных															
2019	А2	0	30.1	7.86	11.236	1.108926	135.49	69.14	20.47	0.46	31.84	2.31	0.79	10.95	
		15		7.82	10.180	1.108964	136.57	69.01	21.26	0.46	32.32	2.36	0.79	10.84	
		25		7.82	11.657	1.109927	138.68	68.27	23.39	0.48	33.22	2.35	0.80	10.64	
		30	7.83	11.688	1.111261	138.72	68.30	23.49	0.46	33.32	2.14	0.76	10.71		
Нет данных															
2019	А2	0	30.1	7.86	11.236	1.108926	135.49	69.14	20.47	0.46	31.84	2.31	0.79	10.95	
		15		7.82	10.180	1.108964	136.57	69.01	21.26	0.46	32.32	2.36	0.79	10.84	
		25		7.82	11.657	1.109927	138.68	68.27	23.39	0.48	33.22	2.35	0.80	10.64	
		30	7.83	11.688	1.111261	138.72	68.30	23.49	0.46	33.32	2.14	0.76	10.71		
Нет данных															



**Рис. 3.** Распределение основных ионов по глубине в западном бассейне большого Аральского моря на станции А2 в 2019 г.

относительного содержания основных ионов. Содержание хлорид-ионов на 1.2% меньше, а сульфатов на 14.7% больше в придонном слое, чем в поверхностном. Содержание ионов натрия в придонном слое выше на 4.6%, а калия на 7.0%, чем в поверхностном. Содержание ионов кальция и магния в придонном слое меньше, чем на поверхности на 5.0 и 4.5% соответственно. Изменения ионного состава на глубине ниже 15 м свидетельствует о химической стратификации водной толщи.

Надо отметить, что в предыдущие годы исследований химическая стратификация была гораздо более выраженной, чем в 2019 г., и часто сопровождалась присутствием сероводорода в нижнем слое [10]. Например, по нашим наблюдениям в 2017 г. по сравнению с 2019 г. в условиях практически одинаковой солености разность относительного содержания ионов в поверхностном и придонном слоях составляла для хлоридов 6.4%, а для сульфатов — 20%, тогда как в 2019 г. она была для хлоридов 1.2%, а для сульфатов 14.7% (табл. 3).

Значение pH в 2019 г. находилось в пределах 7.82–7.86, указывая на слабощелочную реакцию среды, и с глубиной существенно не изменялось. Общая щелочность в придонном слое была выше на 4% по сравнению с поверхностью, а соленость была больше на 2.4%.

Лабораторные измерения аральской воды при помощи прецизионного плотномера позволили нам получить значения плотности при температуре, зафиксированной во время отбора проб (*in situ*) на глубине 0, 10, 20 и 30 м. На рис. 4 графически представлены профили температуры и плотности

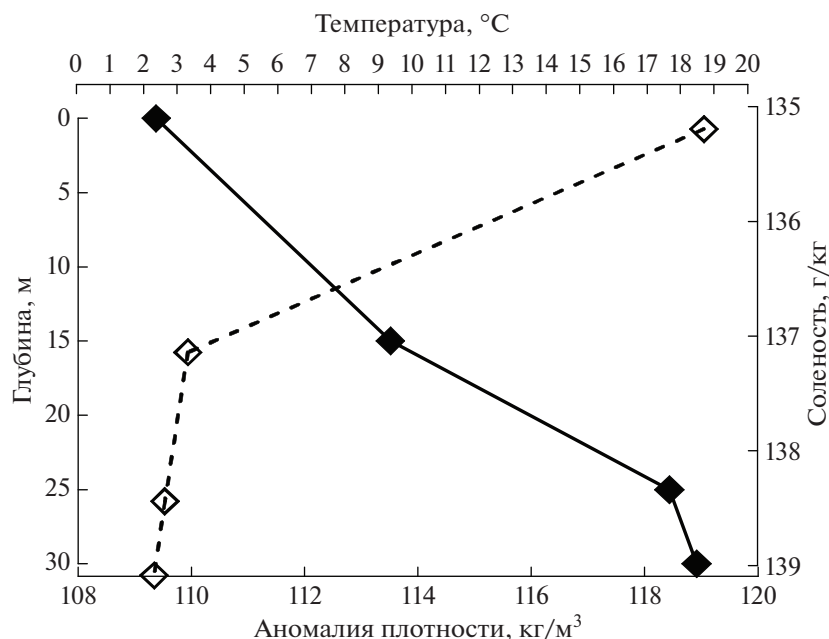
по глубине от 0 до 30 м в 2019 г. Видно, что для значений температуры, измеренной во время отбора проб (*in situ*) плотность воды увеличивается по мере понижения температуры. Повышение плотности вызвано увеличением солености, но этот процесс происходит не линейно. Так, например, разность значений солености в образцах, отобранных с поверхности и с глубины 15 м, составила 1.08 г/кг, а разность значений плотности — 4.10 кг/м³. Разность значений плотности в образцах с глубин 15 и 25 м составила 4.9 кг/м³, а соленость в образце с 25 м превышала соленость с 15 м на 2.1 г/кг. Разность значений плотности в образцах с 25 и 30 м составила всего лишь 0.4 кг/м³, а солености — 0.04 г/кг. То есть наблюдается резкое повышение плотности и понижение температуры в слое воды от 0 до 15 м.

В нижних горизонтах (25–30 м) наблюдаются существенные отличия ионного состава от верхнего слоя (0–25 м). Это свидетельствует о присутствии двухслойной химической стратификации в водной толще озера в мае 2019 г. Данные плотности и температуры позволяют судить о присутствии в мае 2019 г. не только химической и термохалинной, но и плотностной стратификации. Для этой части Аральского моря стратификация водной толщи наблюдалась и ранее и была гораздо более выраженной, о чем сообщается в наших работах [10, 28].

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

История исследования Аральского моря начинается с 1870 г., и первые результаты описаны в работе [5]. На рис. 5 приведены опубликованные





**Рис. 4.** Профили плотности (черные ромбы и сплошная линия) и температуры (белые ромбы и пунктирная линия) воды Аральского моря в мае 2019 г. на глубине от 0 до 30 м.

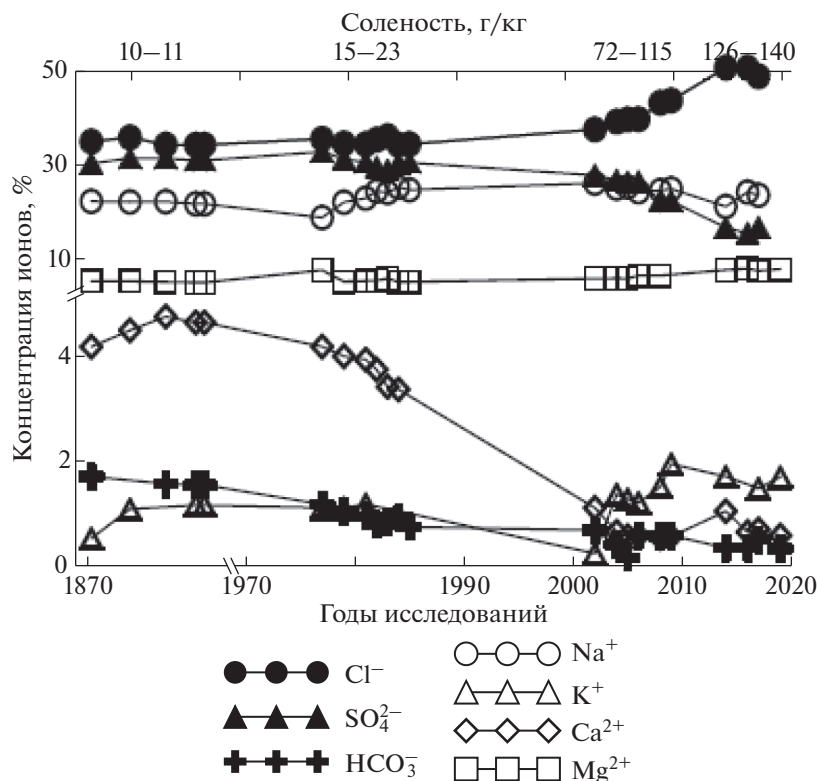
исторические данные ионного состава аральских вод, в которых представлены в основном результаты наблюдений поверхностного слоя моря. Данные концентраций компонентов основного ионного состава Аральского моря в период до 1902 г. были взяты из работ [5], до 1952 г. — из работы [6], с 1980 по 1985 гг. — из работ [1] и [8], с 2002 по 2009 гг. — из работы [10], за 2014 и 2017 гг. — из нашей работы [4], за 2019 гг. — являются результатами данной работы. На рисунке видно, что изменения соотношений основных ионов становятся более выраженными начиная с 1970-х гг.

Эволюция солевого состава замкнутых водоемов вообще и, в частности, Аральского моря представляет собой сложный процесс, который зависит от таких условий как температура воды и воздуха, влажность воздуха, концентрация солевого раствора. Перечисленные факторы влияют на порядок выпадения солей и их обратное растворение из осадка. Вместе с тем соли могут преобразовываться и переходить одни в другие под влиянием этих условий [7, 18]. Процесс эволюции вод Аральского моря представляет особенный интерес из-за уникального первоначального ионного состава его вод. Метаморфизация вод Аральского моря в 1980-х гг. привела к изменению их типа [10]. Первоначально аральские воды принадлежали к сульфатно-натриевому типу — промежуточному между хлоридно-натриевым типом океанских вод и бикарбонатно-кальциевым типом континентальных. Они имели сульфат-хлорное молярное соотношение 0.68 и массовое 0.9 [6]. К октябрю 2005 г. значения массовых соотношений состави-

ли 0.67 в поверхностном слое и до 0.82 в придонном [10]. В апреле 2017 г. оно составило 0.35 в поверхностном слое и 0.45 в придонном [4], а по нашим последним данным в мае 2019 г. оно было 0.30 в поверхностном и 0.34 в придонном слоях. Таким образом, наблюдается ежегодное снижение относительного содержания сульфатов в составе вод Аральского моря.

На рис. 5 вплоть до 1970-х гг. визуально не заметно существенных изменений в солевом составе вод. Однако к этому времени соленость аральской воды уже повысилась, что повлекло, вероятнее всего, интенсивное снижение содержания карбонатов кальция и магния, которые начинают осаждаться в Аральском море при солености 10 г/кг и выше [10]. Простые и сложные карбонаты натрия и магния осаждаются уже на ранней стадии концентрирования озерной воды [18]. Но количество этих солей очень невелико и в результате анализа донных отложений выяснилось, что за 50 лет высыхания Аральского моря к 2008 г. вклад карбонатов магния составлял лишь 2% от всех осажденных солей [10]. Таким образом, можно предположить, что осаждение солей карбоната магния произошло в период с 1960 по 1970 гг.

Существенные изменения в ходе эволюции химического состава становятся заметны начиная с 1980-х гг. (рис. 5), когда значение солености превысило 22 г/кг и началось осаждение солей, вероятно, преимущественно в виде сульфата кальция. Ранее было установлено, что выпадение сульфатов в воде Аральского моря начинается по



**Рис. 5.** Эволюция основного ионного состава в период наблюдений с 1870 по 2019 гг. по нашим и литературным данным [1, 4–6, 8, 10].

достижении им солёности 22–23 г/кг согласно [6, 8] или 25–26 г/кг, как отмечено в [2]. Снижение относительного содержания ионов кальция, наряду с сульфатами, можно наблюдать на рис. 5 при солёности воды около 23 г/кг. В это время, вероятно, происходит осаждение гипса  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (после 1985 г.). На рис. 5 видно, что содержание кальция (белые ромбы) резко опускается ниже границы 3%.

Относительное содержание основных ионов в воде западного бассейна Аральского моря также меняется из года в год (рис. 5). К 2019 г. по сравнению с периодом до 1960 г. относительное содержание ионов хлора повысилось в 1.5 раза, ионов натрия — в 1.05 раза, калия — в 3.2 раза, магния — в 1.5 раза. Содержание остальных компонентов уменьшилось: сульфатов — в 2 раза, гидрокарбонатов — в 5 раз, ионов кальция — в 7 раз. С повышением минерализации более чем на 20 г/кг (период после 1981 г.) становится заметно резкое повышение содержания натрия. Оно несколько снижается после 2000-х гг., когда солёность воды достигла значений ~100 г/кг. Содержание ионов магния остается достаточно консервативным, а при достижении рассолом солёности более 110 г/кг даже повышается.

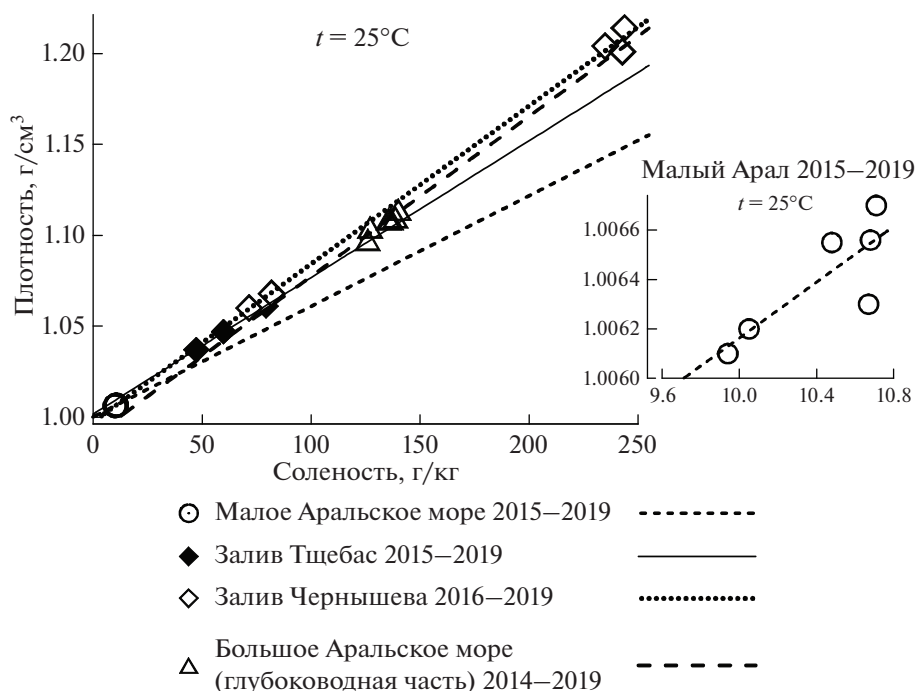
Вот уже много лет относительное содержание магния в поверхностном слое воды Большого

Арала остается довольно стабильным, как и калия. Калий обычно осаждается в соляных озерах в виде минералов каинита  $\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , сильвина  $\text{KCl}$  и карналлита  $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Эти соли образуются в современных соляных озерах путем выпадения из остаточной рапы в период высыхания или на стадии “сухого озера” в верхней части соляной залежи [7, 18]. Калий и магний — самые консервативные катионы. Они также сохраняются в толще воды Аральского моря даже при достижении солёности воды в заливе Чернышева в 2016 г. 240 г/кг [3].

В итоге при падении уровня воды на 56% к настоящему времени относительное содержание хлоридов в воде западного бассейна большого Арала повысилось в 1.5 раза, ионов натрия в 1.05 раза, калия в 3.2, а магния в 1.5 раза соответственно. А содержание сульфатов, гидрокарбонатов и кальция уменьшилось в 2, 5 и 7 раз соответственно.

Хотя в рамках данной работы мы не исследовали газовый состав вод Аральского моря, его изучение учеными Института океанологии выявило присутствие сероводорода и метана преимущественно в придонных горизонтах остаточных водоемов. Оно сопровождалось наличием в глубоких водах моря анаэробных условий, которые





**Рис. 6.** Зависимость плотности от солености воды при температуре 25°C в отдельных водоемах Аральского моря в 2014–2019 гг.

оказывают существенное влияние на гидрохимический режим и геохимию вод [12, 28, 34]. Кратко можно отметить, что в конце 2002 г. в Аральском море был впервые обнаружен сероводород  $H_2S$  в заливе Чернышева — северной оконечности Большого Аральского моря. Сводка наблюдений содержания  $H_2S$  за 2002–2010 гг. представлена в работе [10].

Глубина залегания бескислородного слоя в западном бассейне Большого Арала менялась в широких пределах (от 15 до 35 м), а значения концентраций  $H_2S$  варьировались от 5 до 80 мг/л. В 2012 г. образцы с глубины 30 м и более показали отчетливый запах  $H_2S$  и полное отсутствие  $O_2$ , в 2013 г. верхняя граница  $H_2S$  находилась на 18 м [12]. Присутствие сероводорода обнаруживалось в придонных слоях в 2014 и 2017 гг., но исследования его концентраций не проводилось. В мае 2019 г. ощутимых признаков сероводорода в исследуемых образцах не было. Известно, что, например, весной и летом 2004 г. присутствие сероводорода в придонном слое также не было обнаружено, что связывалось с событиями глубокой конвекции зимой 2003–2004 г. [10].

**Исследования плотности вод Аральского моря.** В нашей работе [3] были представлены величины плотности и солености для двух гипергалинных и одного слабосоленого водоемов Аральского моря — залива Чернышева Большого Арала, оз. Тшебас и Малого Аральского моря, и приведена экстрапо-

ляция для сравнения изменений физико-химических свойств исследуемых водоемов, которые произошли со времени начала усыхания озера. Данные для построения экстраполяции для Малого Аральского моря, залива Чернышева и оз. Тшебас были взяты из работ [4, 10, 22, 28]. Для более полного представления эволюции аральской воды к графику из работы [3] мы добавили экстраполяцию данных плотности и солености для воды глубоководной части западного бассейна Большого Арала за 2014–2019 гг. (рис. 6). На рис. 6 представлен график, отражающий ход физико-химической эволюции вод отдельных водоемов Аральского моря, включая западный бассейн Большого Арала.

На графике видно, что вслед за изменениями ионного состава произошли существенные изменения физических характеристик вод отдельных водоемов Арала, а линии трендов прогнозируют их вероятное дальнейшее состояние в условиях существующих на данный момент. По достижении исследуемыми водоемами максимальной солености — солености залива Чернышева (242 г/кг), отклонение между значениями плотности с оз. Тшебас составило бы 30 кг/м<sup>3</sup>, в случае с Малым Аралом — 70 кг/м<sup>3</sup> [3], а с глубоководной частью Большого Арала составило бы 9 кг/м<sup>3</sup>. Из чего можно заключить, что глубоководная часть и залив Чернышева, являясь частями Большого Арала, в процессе усыхания моря приобрели собственные физико-химические свойства, отлич-

ные не только от других отдельных водоемов Аральского моря, но и друг от друга.

Причинами таких различий являются различные гидрологические режимы этих водоемов, их глубины, площади и удаленность от материкового стока. Существующие в настоящее время отдельные части Аральского моря в процессе эволюции стали различаться не только гидрохимическими характеристиками, но и гидрофизическими параметрами друг от друга. Плотность воды, температура испарения и замерзания в каждом водоеме теперь свои.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспедиции 2019 г. получены гидрохимические характеристики вод западного бассейна Аральского моря. Определена соленость воды, измерение которой стандартным гидрофизическим оборудованием по электропроводности приводит к значительным погрешностям из-за отличия ионного состава воды от океанского. Исследования плотности воды Аральского моря с помощью прецизионного оборудования позволило определить ее распределение в толще воды от поверхности до дна и обнаружить наличие плотностной стратификации.

Обнаружено, что уровень моря испытывает сезонные колебания до 1 м, что сопровождается изменением солености озера, что должно приводить к выраженному сезонному ходу ионно-солевого состава.

Установлено, что в ходе эволюции вод Аральского моря в процессе его усыхания произошли существенные изменения в содержании компонентов основного ионного состава, а также солености и плотности. Так, при падении уровня воды на 56% относительное содержание хлоридов в воде западного бассейна большого Арала повысилось в 1.5 раза, ионов натрия в 1.05 раза, калия в 3.2 раза, а магния в 1.5 раза. Содержание сульфатов, наоборот, уменьшилось в 2 раза, а гидрокарбонатов — в 5 раз и кальция в 7 раз. Эволюция ионного состава вод глубоководной части Большого Арала продолжается до настоящего времени. Она влечет за собой изменения физических свойств воды, таких как плотность и соленость, а также влияет на нормы испарения и температуру замерзания воды.

**Благодарности.** Авторы благодарят всех участников аральских экспедиций за отбор и доставку проб воды и отдельно академика д.б.н. М.В. Флинта за доставку проб в 2016 г.

**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).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алекин О.А., Ляхин Ю. И.* Химия океана: Учеб. пособие для вузов по спец. "Океанология". Л.: Гидрометеиздат, 1984. 343 с.
2. *Амиргалиев Н.А.* Арало-Сырдарьинский бассейн: (гидрохимия, проблемы водной токсикологии). Алматы: ТОО Издательский Дом Бастау, 2007. 224 с.
3. *Андрулионис Н.Ю., Завьялов П.О., Ижицкий А.С.* Современная эволюция солевого состава остаточных бассейнов Аральского моря // *Океанология*. 2021. в печати
4. *Андрулионис Н.Ю., Завьялов П.О.* Лабораторные исследования основного компонентного состава гипергалинных озер // *Морской гидрофизический журн.* 2019. Т. 35. № 1. С. 16–36.
5. *Берг Л.С.* Аральское море: Опыт физико-географической монографии. СПб.: Типография М.М. Стасюлевича, 1908. Т. V. № 9. 580 с.
6. *Блинов Л.К.* Гидрохимия Аральского моря. Л.: Гидрометеиздат, 1956. 233 с.
7. *Валяшко М.Г.* Закономерности формирования месторождений калийных солей. М.: Изд. Моск. университета, 1962. 398 с.
8. *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.
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. *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.
11. *Золотокрылин А.Н.* Индикатор аридности климата // *Аридные Экосистемы*. 2002. Т. 8. № 16. С. 47–69.
12. *Маккаев П.Н., Завьялов П.О., Гордеев В.В. и др.* Гидрохимические характеристики Аральского моря в 2012–2013 гг. // *Водные ресурсы*. 2016. Т. 45. № 2. С. 188–198.
13. *Маккаев П.Н., Стунжас П.А.* Об измерениях солености гипергалинных рассолов на примере современного Аральского моря // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 6. С. 892.
14. *Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А.* Гидрология. М.: Высшая школа, 2007. 463 с.
15. *Общая щелочность морской воды. Методика измерений титриметрическим методом.* М.: ФГУ ГОИН, 2010. 20 с.
16. *Руководство по химическому анализу морских вод.* СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 265 с.
17. *Руководство по эксплуатации DMA 4100 M, DMA 4500 M, DMA 5000 M. // Версия программного обеспечения: V1.70. Номер документа: C761B01F.fm.* Дата: 15 января 2010 г. Опубликовано Anton Paar.

- Грац: Anton Paar GmbH, Австрия Copyright, 2010. 135.
18. Сонненфелд П. Рассолы и эвапориты. М.: Мир, 1988. 475 с.
  19. Стародубцев В. М., Богданец В. А. О формировании почвенного покрова на осушенном дне Аральского моря // Проблемы освоения пустынь. 2007. № 3. С. 34–40.
  20. 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.
  21. 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.
  22. Friedrich J., Oberhansli H. Hydrochemical properties of the Aral Sea water in summer 2002 // Journal of Marine Systems. 2004. V. 47. P. 77–88.
  23. Ge Y., Abuduwaili J., Ma L. Lakes in Arid Land and Saline Dust Storms // E3S Web of Conferences. 2019. V. 99. 01007.
  24. <https://earthshots.usgs.gov/earthshots/node/91#ad-image-0-0>
  25. <http://proba-v.vgt.vito.be/en/proba-v-gallery>
  26. 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.
  27. Izhitskaya E.S., Egorov A.V., Zavialov P.O. et al. Dissolved methane in the residual basins of the Aral Sea // Environ. Res. Lett. 2019. V. 14(6).
  28. 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.
  29. Jones B.F., Deocampo D.M. Geochemistry of saline lakes // Treatise on Geochemistry. 2003. V. 5 P. 393–424.
  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. The Aral Sea Environment / Kostianoy A., Kosarev N. (eds.). Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2010. 332 p.
  33. White K. Nature and Economy in the Aral Sea Basin // The Aral Sea. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. P. 301–335.
  34. Zavialov P.O., Ni A.A., Kudryshkin T.V. et al. Ongoing changes of ionic composition and dissolved gases in the Aral Sea // Aquatic geochemistry. 2009. V. 15. P. 263–275.
  35. 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 Western Basin Waters of the Aral Sea

N. Yu. Andrulionis<sup>a, #</sup>, P. O. Zavialov<sup>a, ##</sup>, A. S. Izhitskiy<sup>a, ###</sup>

<sup>a</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: natalya@ocean.ru*

<sup>##</sup>*e-mail: peter@ocean.ru*

<sup>###</sup>*e-mail: izh@ocean.ru*

During the expedition in 2019, hydrochemical studies were carried out in the western basin of the Large Aral Sea, on the territory of Uzbekistan. Water samples were taken in the deep-water part of the western basin from various horizons. The maximum depth of the lake at the time of sampling was 30 m. This work is a part of the studies of the evolution of the residual water bodies of the Aral Sea. It describes the evolution of the chemical composition of the Aral Sea water observed in the lake since the beginning of its desiccation and continuing to the present time in all the residual water bodies of the Aral Sea. It has been established that the deep-water part of the western basin of the Large Aral currently has a salinity of about 140 g/kg<sup>-1</sup> and occupies an intermediate position between the brackish Small Aral Sea and the hyperhaline Chernyshev Bay of the Large Aral. The salinity of the lake increases every year and has seasonal changes along with fluctuations of the lake level. It was found that with an increase in salinity for every 1 g/kg<sup>-1</sup>, the density increases by 1.2 kg/m<sup>3</sup>, both in the surface and bottom layers.

**Keywords:** evolution of water composition, basic ionic composition, component composition, water metamorphization, hyperhaline lake, Aral Sea, salt lakes, Large Aral, hydrochemical properties