

---

---

**ГИДРОХИМИЯ, ГИДРОБИОЛОГИЯ,  
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ**

---

---

УДК 543.067.5

**ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АРАЛЬСКОГО МОРЯ  
В 2012–2013 гг.<sup>1)</sup>**

© 2018 г. П. Н. Маккавеев\*, В. В. Гордеев\*\*, П. О. Завьялов,  
А. А. Полухин, П. В. Хлебопашев, А. И. Коченкова

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН  
117997 Москва, Нахимовский просп., 36*

*\*E-mail: makkaveev55@mail.ru; \*\*gordeev@ocean.ru*

Поступила в редакцию 12.05.2015 г.

После доработки 22.03.2016 г.

Сокращение площади Аральского моря, начавшееся в 1960-х гг., привело к значительным изменениям гидрологической, химической и биологической структуры морских вод. Регулярные наблюдения за химическим составом вод Арала прекратились в начале 1990-х гг. Практически полностью отсутствовали наблюдения за концентрациями соединений биогенных элементов в водах (так называемые анализы “первого дня”). В сентябре 2012 и октябре 2013 гг. в ходе экспедиций Института океанологии РАН в прибрежных водах Аральского моря был проведен комплекс гидрохимических наблюдений, включавший в себя измерения концентраций соединений биогенных элементов, растворенного кислорода, сероводорода и компонентов карбонатного равновесия. Одной из целей работ была отработка методов гидрохимических исследований в условиях повышенной солености (минерализации) воды. Помимо стандартного гидрохимического комплекса, проводился сбор проб для определения общей минерализации вод и содержания растворенных и взвешенных форм металлов. Приведены результаты указанных исследований.

*Ключевые слова:* Аральское море, соединения биогенных элементов, минерализация.

**DOI:** 10.7868/S0321059618020049

В 2012 и 2013 гг. в ходе экспедиций, проводимых ИО РАН совместно с Институтом геологии и геофизики им. Абдуллаева АН Узбекистана, Нукусским государственным педагогическим институтом им. Ажияза (Узбекистан), Каракалпакским государственным университетом им. Бердаха и Международным казахско-турецким университетом им Ясави (Казахстан), на Аральском море выполнялись гидрохимические исследования. База экспедиции находилась на метеорологической станции Актумсук Узгидромета (рис. 1), расположенной на плато Устюрт в 8 км от современной береговой линии. Гидрохимические условия водоемов, находящихся на такой стадии деградации, как Аральское море, – уникальный пример катастрофических последствий воздействия на природные водные объекты как антропогенных факторов, так и климатических изменений. В данном случае Арал можно рассматривать как уникальную природную лабораторию.

Задачами гидрохимической группы были: измерение концентраций соединений биогенных элементов в воде Аральского моря и отработка методов гидрохимических исследований в условиях повышенной солености (минерализации) воды. Корректное определение концентраций биогенных веществ практически исключает длительную транспортировку проб воды. Чем скорее выполняются их анализы, тем более достоверны получаемые результаты. Допустимое время хранения проб воды, по методическим руководствам по проведению химического анализа природных вод, от 6 до 12 ч после их отбора [9]. Их консервация (например, путем замораживания пробы) увеличивает риск получения недостоверных результатов. Так, при процедуре замораживания проб воды, особенно при повышенном содержании в пробе воды минерального углерода, может происходить образование труднорастворимого осадка. По этой причине анализы проб воды для определения содержания фосфатов, различных форм азота (нитратов, нитритов и аммония) и рН воды иногда называют “анализами первого дня”. Впервые с начала 1990-х гг. непосредственно на

---

<sup>1)</sup> Работа выполнена в рамках Программы Президиума РАН № 49 и Проекта 2439/ГФ 4 Комитета Науки МОН РК.

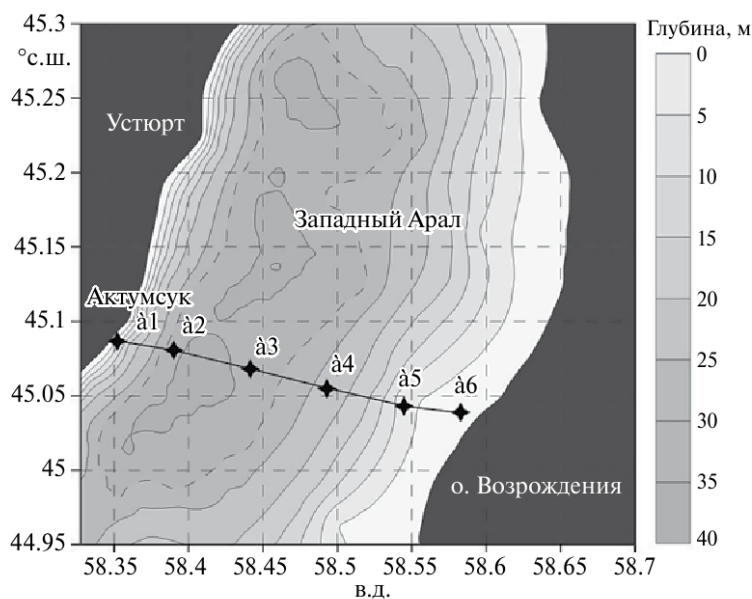


Рис. 1. Карта-схема расположения станций, на которых в 2012 и 2013 гг. проводились гидрохимические наблюдения.

берегу Арала выполнен комплекс гидрохимических работ, включающий в себя определение величин pH и общей щелочности (Alk), концентраций растворенного кислорода ( $O_2$ ), сероводорода ( $H_2S$ ), биогенных элементов – растворенного неорганического P, Si, N (в нитратной, нитритной и аммонийной формах). Гидрохимический анализ проводился во временной лаборатории, развернутой на упомянутой выше метеостанции. Там же проводилась фильтрация и консервация проб для последующего определения содержания металлов, взвешенного вещества и общей минерализации воды в стационарных лабораториях.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Отбор проб воды для гидрохимического анализа проводился в море: в 2012 г – 26, 27, 28 сентября, а в 2013 г. – 30, 31 октября и 2 ноября. Отбор проб воды проводился пластиковыми батометрами Нискина емкостью 5 л с помощью ручной лебедки, установленной на надувной лодке. Отбору проб воды предшествовало вертикальное зондирование водной массы STD-зондом (SBE19 plus). Непосредственно после отбора проб воды проводилась их фиксация на  $O_2$ ,  $H_2S$  и иона аммония, а также подготовка проб для других анализов и для их отправки в стационарные лаборатории. Пробы воды помещались в пластиковые флаконы. В 2012 г. отбор проб воды проводился с 17-ти, а в 2013 г. – с 20-ти горизонтов. С учетом необходимости методических работ было выполнено значительное количество параллельных определений химических показателей с применением различных методов анализа и подготовки проб.

Фильтрация проб воды проводилась через ядерные фильтры диаметром 47 мм с размером пор 0.4 мкм. 50 мл фильтрата подкислялось  $HNO_3$  высокой очистки до pH 2. Фильтры использовались для определения общего содержания взвешенного вещества и анализа взвешенных форм металлов. Содержание растворенных и взвешенных металлов определялось на атомно-абсорбционном спектрофотометре “Квант-2А” в лаборатории физико-геологических исследований ИО РАН. Для контроля точности определений использовались стандартные образцы воды SLRS-4 и SLEW-3 (Канада). Анализ проб воды с соленостью более 10 PSU выполнялся при разбавлении в 2 раза для уменьшения фона солевой матрицы.

При концентрациях металлов выше нескольких мкг/л стандартное отклонение параллельных определений находилось в пределах  $\pm 10\%$ , при более низких концентрациях погрешность аналитических определений возрастала до  $\geq 30\%$ . Ядерные фильтры со взвесью растворялись в смеси малых количеств  $HNO_3$ , HF,  $H_2O_2$  в тefлоновых стаканах, помещенных в ультразвуковую ванну “Сапфир” при  $+65^\circ C$ .

Для контроля качества анализов использовались китайские стандарты донных отложений GSD-2 и GSD-6. Стандартные погрешности определений взвешенного вещества при навесках 2–3 мг и выше составляли 10–15%, при навесках меньшего веса  $\geq 20–30\%$ .

С 1960-х гг. минерализация (соленость) вод Арала повысилась с  $\sim 10$  г/кг до  $\geq 100$  г/кг в западном бассейне, а в восточном бассейне, по данным 2008 г., превысила 200 г/кг [2]. Как и при исследовании других гипергалинных водоемов, серьезной проблемой гидрохимических определений была адаптация

существующих методов к условиям повышенной солености исследуемых вод [13]. Как упоминалось выше, одним из основных для гидрохимической группы был вопрос о применимости стандартных методик гидрохимических работ при высокой минерализации и специфического ионного состава вод Аральского моря. Наиболее простым и надежным решением задачи адаптации стандартных гидрохимических методик к высокой минерализации в условиях временной лаборатории было разведение проб. Колориметрические определения проводились в пробах воды, а также при их разбавлении дистиллированной водой в пропорции 1 : 4 и 1 : 3, что приближало их по минерализации/солености к океанической воде. В каждой серии проб воды определялось и содержание исследуемого вещества в дистиллированной воде для учета степени ее загрязнения этим веществом.

В разбавленных пробах расчет содержания определяемого вещества проводился по следующей формуле:

$$C = K ((D_s - D_o) - (D_{dw} - D_o)(1 - St))/St,$$

где  $C$  – концентрация определяемого вещества;  $D_s$  – оптическая плотность пробы при соответствующей методике длине волны;  $K$  и  $D_o$  – коэффициент пересчета и бланковая поправка на реактивы, которые определялись в стационарной лаборатории при определении калибровочного коэффициента метода;  $D_{dw}$  – оптическая плотность дистиллированной воды с реактивами, которая определяется одновременно с каждой серией проб;  $St$  – доля аральской воды в колориметрируемой пробе.

Содержание  $O_2$  в морской воде определялось методом Винклера [11, 12]. Содержание  $H_2S$  определялось методом иодометрического титрования [11, 12]. Определение общей титруемой  $Alk$  проводилось методом прямого титрования (метод Бруевича) с визуальным определением точки конца титрования [12]. Определение растворенных силикатов (или неорганического  $Si$ ) проводилось методом Королева по голубому кремнемолибденовому комплексу [11, 12]. Определение содержания растворенного неорганического фосфора (фосфатов) проводилось методом Морфи–Райли [14], нитритного азота – методом Бендшнайдера–Робинсона в модификации “единого цветного реактива” [11], азота нитратов – методом восстановления до нитритов на омедненном  $Cd$  [11, 12], аммония (ион аммония) – колориметрически, фенолят-гипохлоридным методом [12]. Определение  $pH$  в пробах воды выполнялось потенциометрическим методом в единицах практической шкалы NBS.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МЕТОДИЧЕСКИХ РАБОТ

Установлено, что при анализе неразбавленных проб воды неприменимы методы определения азота нитритов и азота нитратов с “единым цветным реактивом” и определения фосфатов методом

Морфи–Райли. Окраска в пробах не развивалась или развивалась слабо, сходимость параллельных определений была исключительно низкой. Систематической разницы между значениями, полученными для разбавленных и неразбавленных проб, нет. При высоких концентрациях фосфатов и азота нитритов (более 1.5 и 0.1  $\mu M$  соответственно) в исследуемой воде изменение окраски в неразбавленных пробах воды практически прекращается.

Метод определения концентрации  $Si$  по Королеву в неразбавленных пробах воды давал результаты, заниженные в среднем на 9% по сравнению с разбавленными пробами, но это может быть связано с тем, что эмпирическая формула поправки на соленость воды [12] недостаточно корректна при столь высокой ее минерализации. Определение азота нитратов проводилось только в разбавленной воде, так как, во-первых, колонки могут потерять восстановительную способность, во-вторых, “единый цветной” реактив, как это было показано при определении нитритов, при высокой солености воды не обеспечивает в должной степени ее окраску. Определение иона аммония фенол-гипохлоридным методом применимо только при разбавлении проб (минимум в 4 раза). Разбавление пробы дистиллированной водой следует проводить при отборе пробы воды из батометра до введения в воду реактивов для фиксации определяемых веществ.

Для проверки применимости метода определения растворенного  $O_2$  (метод Винклера), при использовании которого разбавление пробы методически невозможно, был проведен следующий эксперимент. Пробы воды приводились в состояние насыщения по  $O_2$  в береговой лаборатории (продувка воздухом 15–20 мин). После этого вода разливалась по кислородным склянкам, и в них вводились реактивы, фиксирующие  $O_2$ . Затем после оседания осадка в них определялось содержание  $O_2$ . Расчет по формуле Вейса [12] показал степень насыщения в этих пробах от 98 до 103%, что можно считать весьма хорошим показателем применимости метода Винклера для вод с такой величиной минерализации и специфическим ее составом.

Метод определения растворенного  $H_2S$  путем титрования 0.02N раствором гипосульфита нормально работает в неразбавленной воде, как и метод определения  $O_2$  (по Винклеру).

Для определения общей титруемой  $Alk$  (методом прямого титрования по Бруевичу) разбавление воды не требуется, методика не имеет ограничения по ее солености. Но так как естественная величина общей щелочности была слишком большая – до 17 мг-экв/л, для удобства проведения анализа и сокращения его времени пробы разбавлялись в 2–3 раза непосредственно перед титрованием.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНЕРАЛИЗАЦИИ (СОЛЕННОСТИ) ВОДЫ

Обработка собранных проб воды была продолжена в Лаборатории биогеохимии ИОРАН. В лабораторных условиях установлены содержания общего растворенного N и P и проведено весовое определение солёности (минерализации). Определение общей минерализации вод, так называемого сухого остатка [6, 15], чрезвычайно важно для корректировки данных STD-зондирования водного столба. Последние опубликованные данные по ионно-солевому составу вод Арала относятся к 2009 г. [2]. Для получения достоверных результатов о величине минерализации аральских вод были проведены работы по определению так называемого сухого остатка [6, 15]. Пробой воды наполнялись предварительно откалиброванные колбы ёмкостью 100 мл, их взвешивали, что давало возможность определить плотность воды. Затем пробы переносились в никелевые чашки. Вначале выпаривание проводилось в сушильном

шкафу (при температуре, не превышающей 100°C, чтобы не допустить вскипания и разбрызгивания пробы). После визуального исчезновения жидкой фазы температура повышалась до 150–180°C, и выпаривание шло до достижения постоянного веса (разница между последовательными измерениями составляла не более 1–2 мг). Затем пробу нагревали до 450–480°C для выжигания органического вещества [9]. Все пробы определялись минимум в двух повторностях. Расхождение между определениями минерализации и плотности составило 0.2–0.3%. В табл. 1 приведены результаты определения минерализации вод для ст. А2, которая соответствует наибольшей глубине моря в Западном Арале (45° 06' с.ш., 58° 23' в.д.) и где наблюдения проводились с 2002 г. практически ежегодно. Данные по минерализации вод различных акваторий Аральского моря, полученные методом “сухого остатка”, приведены в табл. 2.

Видно, что всего за 3 года значительно изменился профиль солёности воды – он “выравнивался”.

**Таблица 1.** Данные по минерализации вод Аральского моря (Западный Арал) для ст. А2 (здесь и в табл. 2–4 прочерк – отсутствие данных)

Горизонт, м	Минерализация, г/кг	Плотность, кг/дм <sup>3</sup>	Горизонт, м	Минерализация, г/кг	Плотность, кг/дм <sup>3</sup>	Горизонт, м	Минерализация, г/кг	Плотность, кг/дм <sup>3</sup>
2012 г.			2013 г.			2014 г.		
0	105.04	1.0869	0	114.39	1.0923	0	115.36	1.0924
–	–	–	5	113.59	1.0915	–	–	–
10	105.64	1.0845	10	113.83	1.0919	–	–	–
–	–	–	15	114.76	1.0923	–	–	–
–	–	–	20	115.67	1.0925	–	–	–
35	128.74	1.1014	25	118.47	1.0969	–	–	–
38	144.33	1.1115	31	126.83	1.1024	34	121.45	1.0985

**Таблица 2.** Данные по минерализации вод различных акваторий Аральского моря

Место и дата отбора проб воды	Координаты	Глубина, м	Минерализация, г/кг	Плотность, кг/дм <sup>3</sup>
зал. Чернышева 21.10.2014	45°58.26' с.ш., 59°12.79' в.д.	0 м	128.53	1.112
зал. Чернышева 22.10.2014	45°56.06' с.ш., 59°11.55' в.д.	0	131.66	1.112
		5	133.85	1.113
зал. Тшебас 24.10.2014	46°16.76' с.ш., 59°37.98' в.д.	0	91.92	1.071
		4	92.04	1.071
Малое море, зал. Шевченко 25.10.2014	46°23.81' с.ш., 60°119.39' в.д.	0	11.101	1.006
		–	–	–
Малое море, зал. Шевченко 25.10.2014	46°22.66' с.ш., 60°09.03' в.д.	0	10.72	1.004
		4	10.92	1.005

Если на поверхности минерализация вод выросла на ~10%, то в придонном слое, напротив, уменьшилась на ~15%. Возможно, это связано с ослаблением влияния вод восточного бассейна, приток которых практически прекратился в последние годы [2]. Однако приблизительный расчет показывает, что общий запас солей в столбе воды за эти годы увеличился более чем на 10%, что, вероятно, связано с адвекцией соли, например из восточного бассейна или из зал. Чернышева.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ РАБОТ

В 2012 и 2013 гг. гидрохимические работы выполнялись главным образом на разрезе, проходящем через Западный бассейн (рис. 1) соответственно в осенний период (26–28 сентября) и при переходе от осеннего периода к зимнему (30 октября – 2 ноября). Естественно, что сезонные изменения сильно сказались на концентрациях соединений биогенных элементов и других гидрохимических параметров (табл. 3). Очевидно, что значительное влияние на распределение гидрохимических параметров оказало изменение профиля солености вод, которое произошло за последние годы. Сглаживание вертикального профиля минерализации воды вызвало устойчивость плотностной стратификации вод и усиление вертикального обмена.

Значительное влияние на гидрохимический режим оказывают и анаэробные условия в глубинных водах. По данным [2],  $H_2S$  в глубинных водах Арала был обнаружен в 2002 г., однако его присутствие не исключается и в предшествующий период, но данные по химии вод за 1991–2002 г. отсутствуют.

В [1] упоминаются относящиеся к началу XX в. сведения о наличии запаха  $H_2S$  в осадках и придонных водах, но инструментальных определений не проводилось. В середине XX в. считалось, что воды Арала хорошо аэрированы за счет вертикального перемешивания и развития фотосинтетических процессов по всему столбу воды [1]. Наличие  $H_2S$  в 2002–2010 гг. фиксировалось на глубинах 15–35 м. Наиболее высокое содержание  $H_2S$  (80 мг/л) было отмечено в 2003 г. [2]. В 2012 г. в пробах с глубины 30 м и больше отчетливо ощущался запах  $H_2S$  и полностью отсутствовал  $O_2$ . Причина образования  $H_2S$  – устойчивая стратификация вод и низкое содержание  $O_2$  (его растворимость значительно снижается при повышении солености воды) при высоком содержании органического вещества (ОВ). В 2013 г. верхняя граница обнаружения  $H_2S$  поднялась до 18 м.

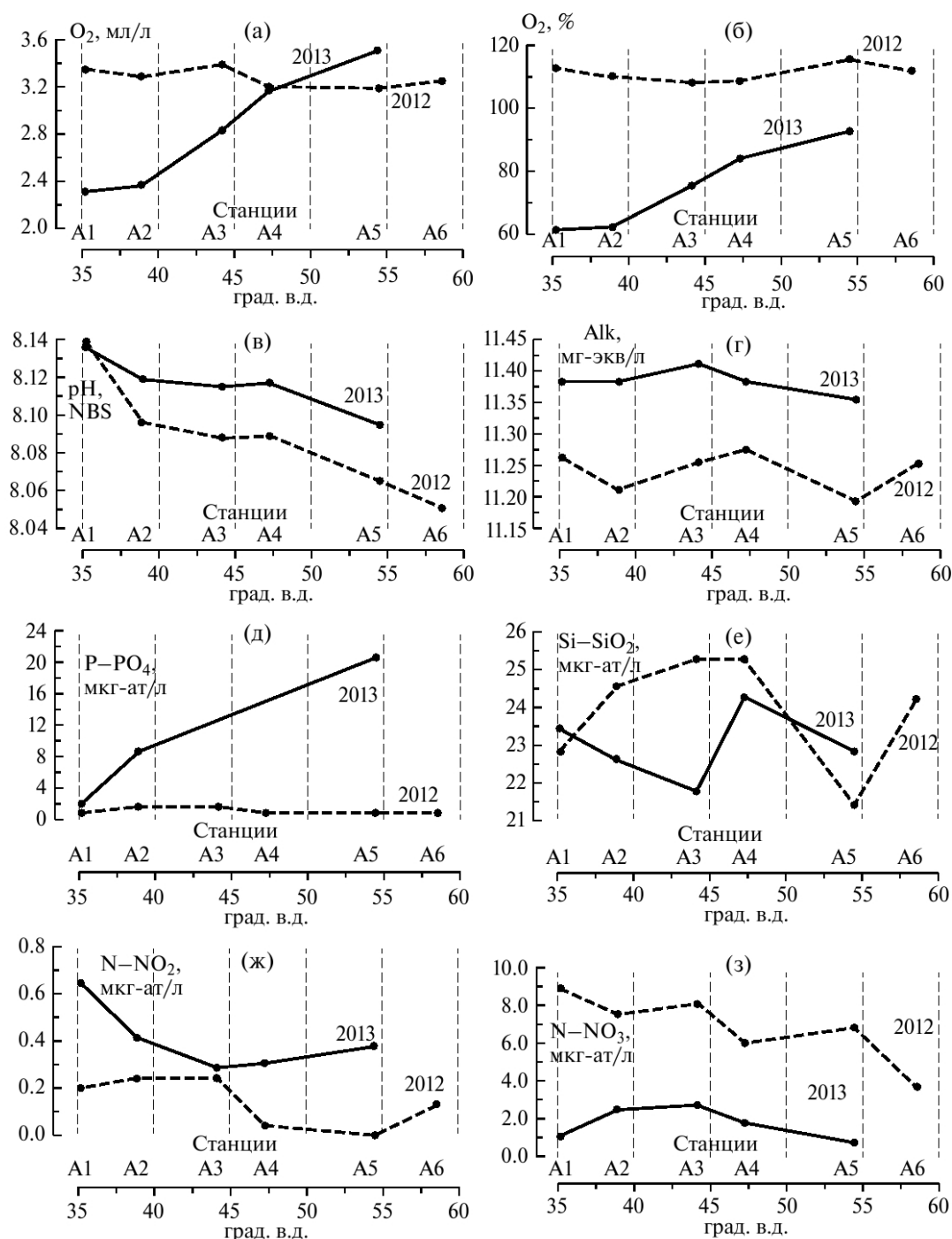
Распределение гидрохимических параметров на разрезе, проходящем через западный бассейн по ~58° с.ш., показало, что гидрохимический состав поверхностных вод (до глубины 15–20 м) достаточно однороден по вертикали, однако от восточного берега к западному наблюдались значительные вариации состава вод (рис. 2).

В 2012 г. во время наблюдений активно шли процессы продуцирования ОВ; интенсивность окислительных процессов, напротив, была очень слабой. Относительное содержание  $O_2$  в поверхностных водах было высоким. Степень насыщения вод по  $O_2$  на поверхности составляло в среднем >110%. В 2013 г. работы, напротив, проходили при спаде биологической активности, насыщение вод по  $O_2$  на поверхности не превышало 90%, а в некоторых случаях снижалось до

**Таблица 3.** Гидрохимические характеристики поверхностных вод Аральского моря (по результатам съемок 2012 и 2013 гг.)

Параметр	2012 г.		2013 г.	
	Среднее	Пределы	Среднее	Пределы
Кислород, мл/л	3.28	0–3.38	2.22	0–3.51
Кислород, %	111.3	0–115.8	58.8	0–92.8
pH, ед. NBS	8.11	8.05–8.16	8.11	8.01–8.15
Alk, мг-экв/л	11.260	11.109–11.448	11.49	11.16–12.78
P-PO <sub>4</sub> , мкг-ат/л	1.80	0.24–8.96	6.92	0.79–14.59
P <sub>общ.</sub> , мкг-ат/л	3.55	1.43–17.1	–	–
N-NO <sub>2</sub> , мкг-ат/л	0.09	0–0.24	0.53	0.23–0.98
N-NO <sub>3</sub> , мкг-ат/л	6.35	1.27–11.34	1.26	0–2.70
N-NH <sub>4</sub> , мкг-ат/л	–	–	70.93	12.70–255.6
N <sub>общ.</sub> , мкг-ат/л	276.6	209.1–424.0	516.1	317.1–651.7
Si-SiO <sub>2</sub> , мкг-ат/л	43.44	39.42–46.39	33.59	17.27–120.27
H <sub>2</sub> S, мл/л	–	–	22.78	0–48.19





**Рис. 2.** Распределение в поверхностных водах на разрезе через западный бассейн Арала гидрохимических параметров: а – растворенного O<sub>2</sub>; б – насыщения вод O<sub>2</sub>; в – pH; г – общая Alk; д – фосфаты; е – растворенный Si; ж – N нитритов; з – N нитратов.

≤60%. В средней части разреза в 2012 г. содержание растворенного O<sub>2</sub> несколько увеличивалось, но насыщение им вод уменьшалось до 108% (рис. 2а, 2б). Это связано, во-первых, с понижением температуры воды (следовательно, и увеличением растворимости O<sub>2</sub>) и, во-вторых, с тем, что у берегов биологическая активность, как правило, выше.

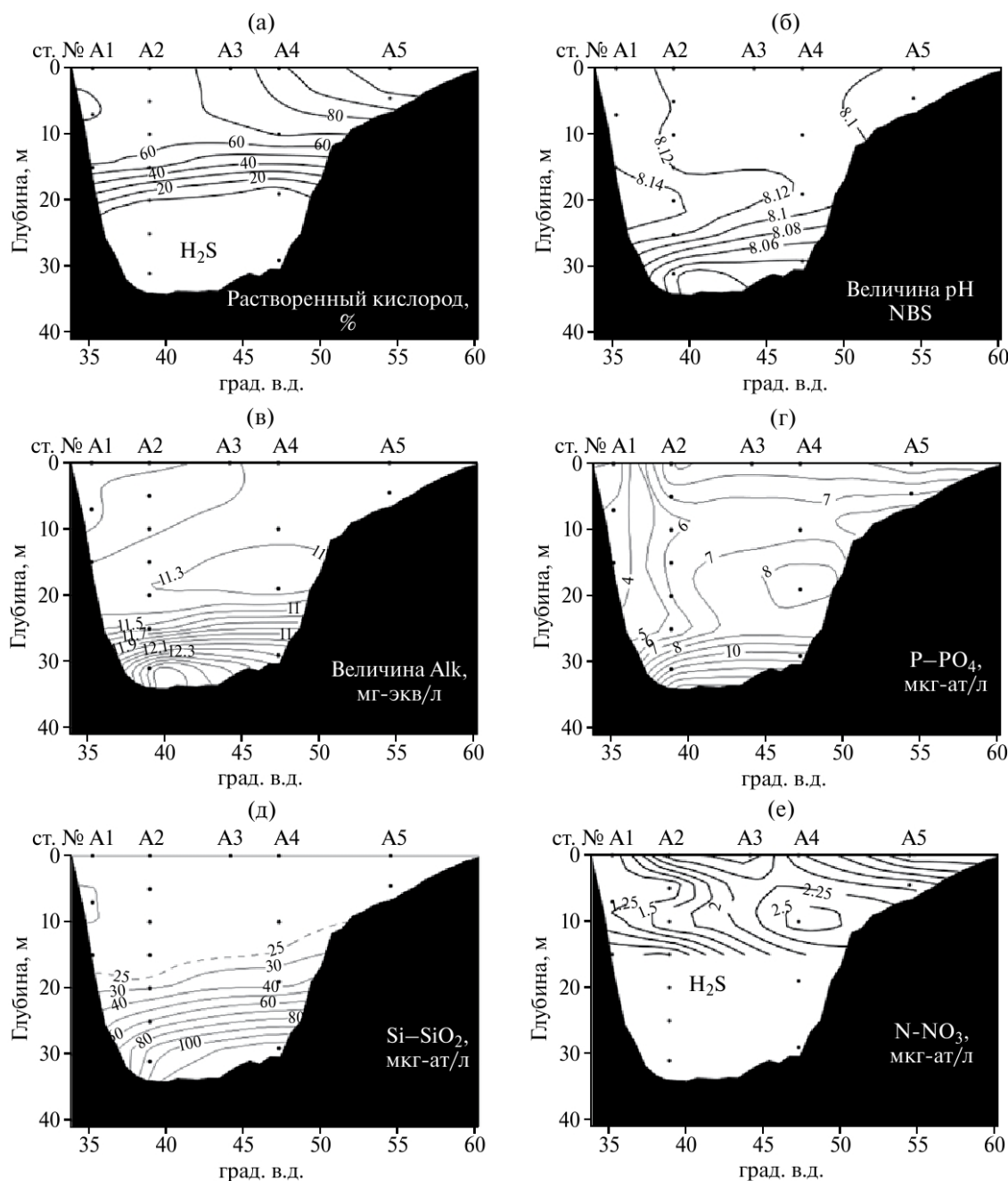
В 2013 г. содержание растворенного O<sub>2</sub> и степень насыщения им воды возрастали от западного берега к восточному. В отличие от ситуации в 2012 г., увеличение содержания O<sub>2</sub> не связано с изменением температуры воды, которая во время этой съемки фактически не менялась по разрезу (диапазон изменения температуры поверхностных вод составлял 12.12–12.59°C). Увеличение абсолютного и относительного

содержания  $O_2$  у западного берега наблюдалось во всем верхнем слое (рис. 3а).

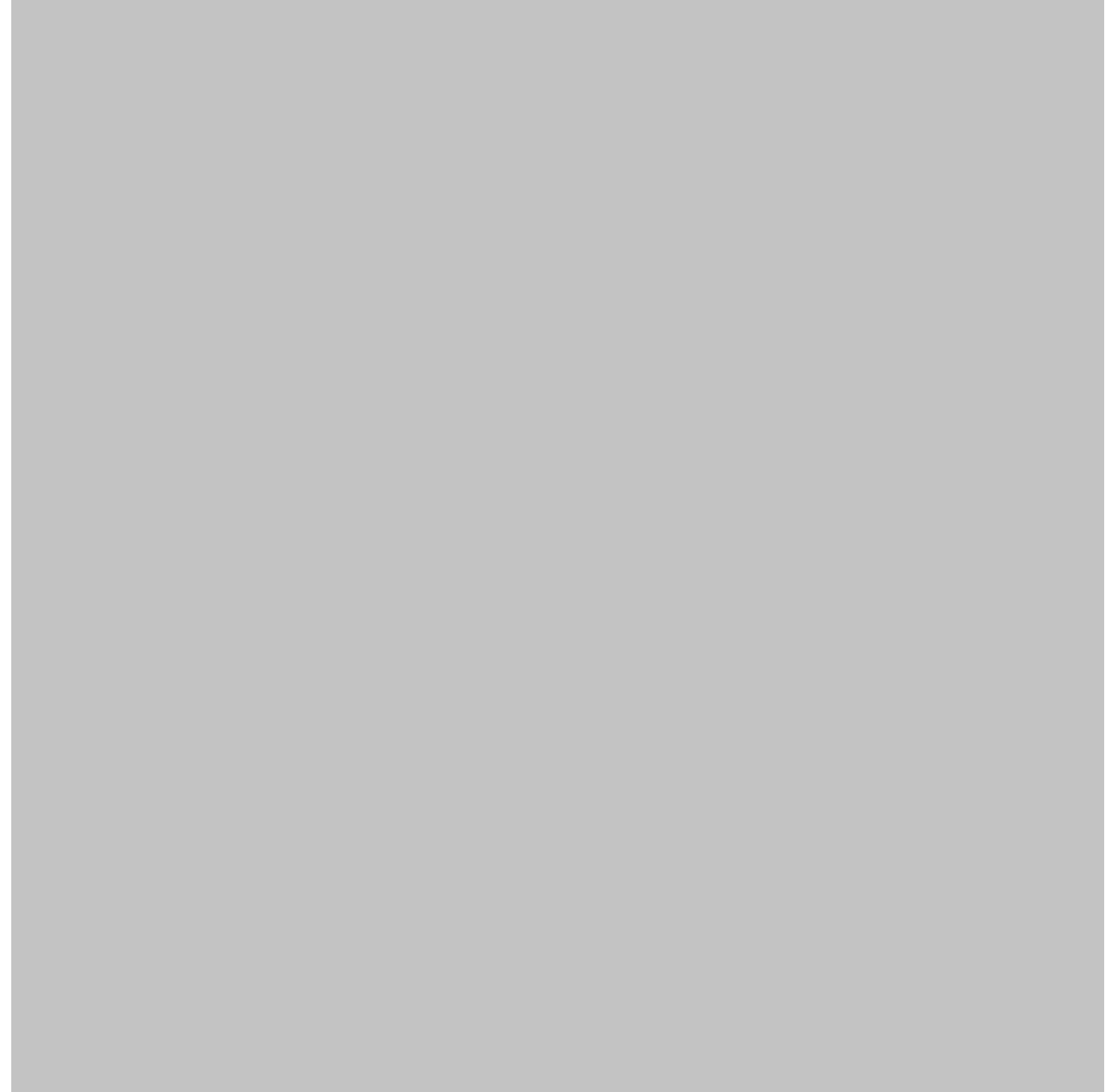
Величина рН воды и в 2012, и в 2013 гг. снижалась от западного берега к восточному, изменяясь не так, как величина растворенного  $O_2$ , хотя обычно динамика этих величин сходная. В 2012 г. это могло быть связано с небольшим повышением температуры поверхностных вод у восточного берега, но целиком изменение рН не может быть объяснено только

разницей температуры поверхностных вод у восточного и западного берегов. Диапазон изменения температуры поверхностных вод составил  $1.26^\circ\text{C}$ , что эквивалентно изменению величины рН на  $0.01-0.02$  ед. NBS.

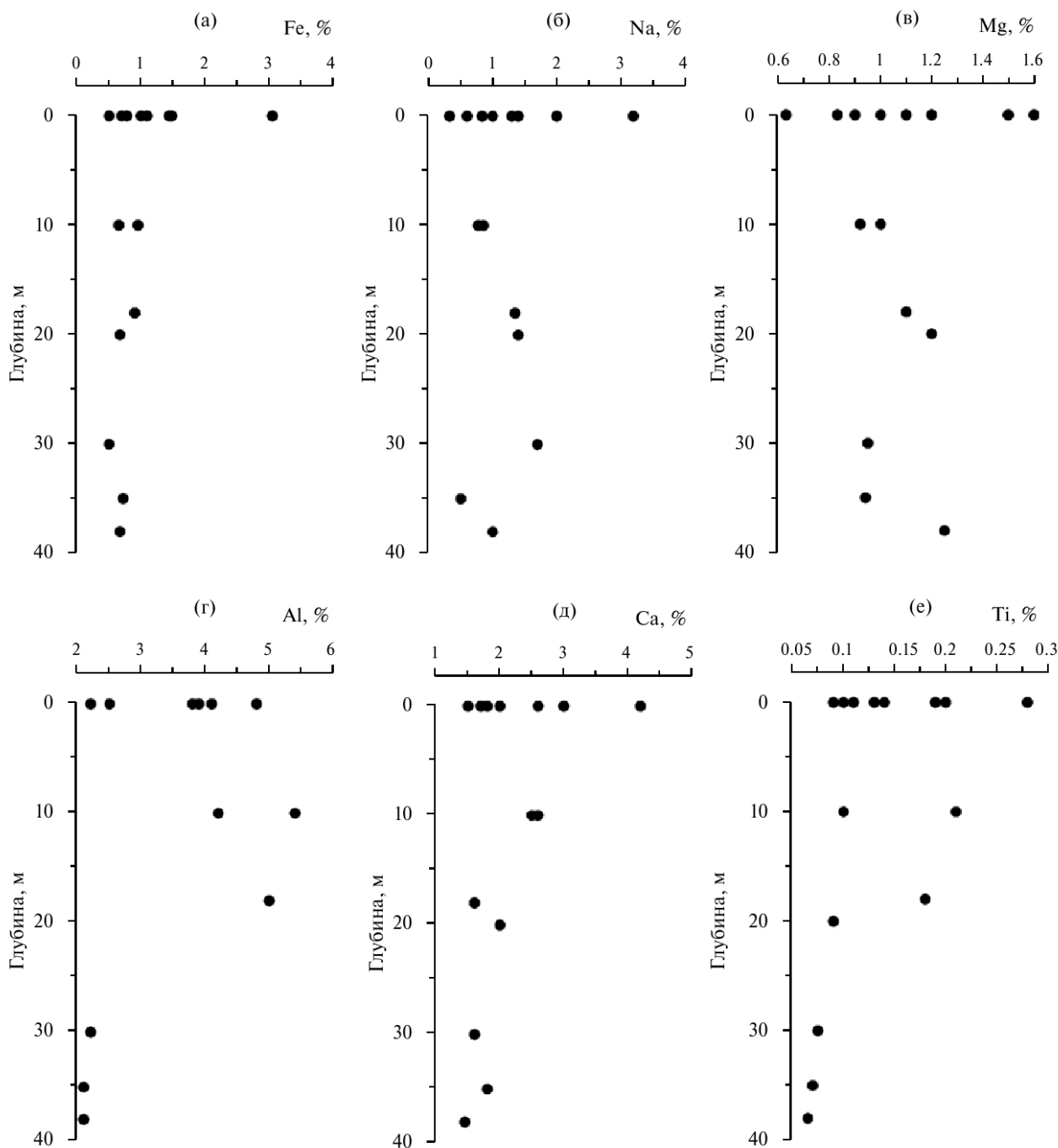
В 2013 г. температура поверхностных вод была практически одинаковой по разрезу, изменения составили всего  $0.47^\circ\text{C}$ . Возможно, рост рН у западного берега связан с особенностями функционирования



**Рис. 3.** Распределение на разрезе по  $58.5^\circ\text{с.ш.}$  в октябре 2013 г.: а – насыщения вод растворенным  $O_2$ , %; б – рН, ед. NBS; г – общей титруемой Alk, мг-экв/л; д – содержания растворенного неорганического P, мкг-ат/л; е – содержания растворенного неорганического Si, мкг-ат/л; ж – содержания азота нитратов, мкг-ат/л.







**Рис. 4.** Вертикальное распределение взвешенных форм: а – Fe, б – Na, в – Mn, г – Al, д – Ca, е – Ti, % от количества взвешенного вещества, по результатам работ 2013 г.

глубины отбора в несколько метров могло оказывать сильное влияние на результаты анализа воды.

По данным наблюдений в 2013 г. можно предположить, что имело место “сползание” вод по западному склону, вызванное активным выхолаживанием вод в мелководной части моря. Этому могло способствовать и ослабление стратификации вод. На опускание вод по склону указывает изгиб изолиний содержания растворенных неорганических форм P и Si и величины рН. Возможно, именно с этим связано необычно

высокое содержание нитратного N и высокие значения рН воды у верхней границы анаэробного слоя.

Во взвеси в основной массе вод относительная доля металлов практически постоянна, что может указывать на общий генезис взвеси. Среднее содержание наиболее распространенных металлов на глубинах более 10 м приведено в табл. 4. Для поверхности наблюдается значительный “разброс” данных (рис. 4). Изменчивость относительного

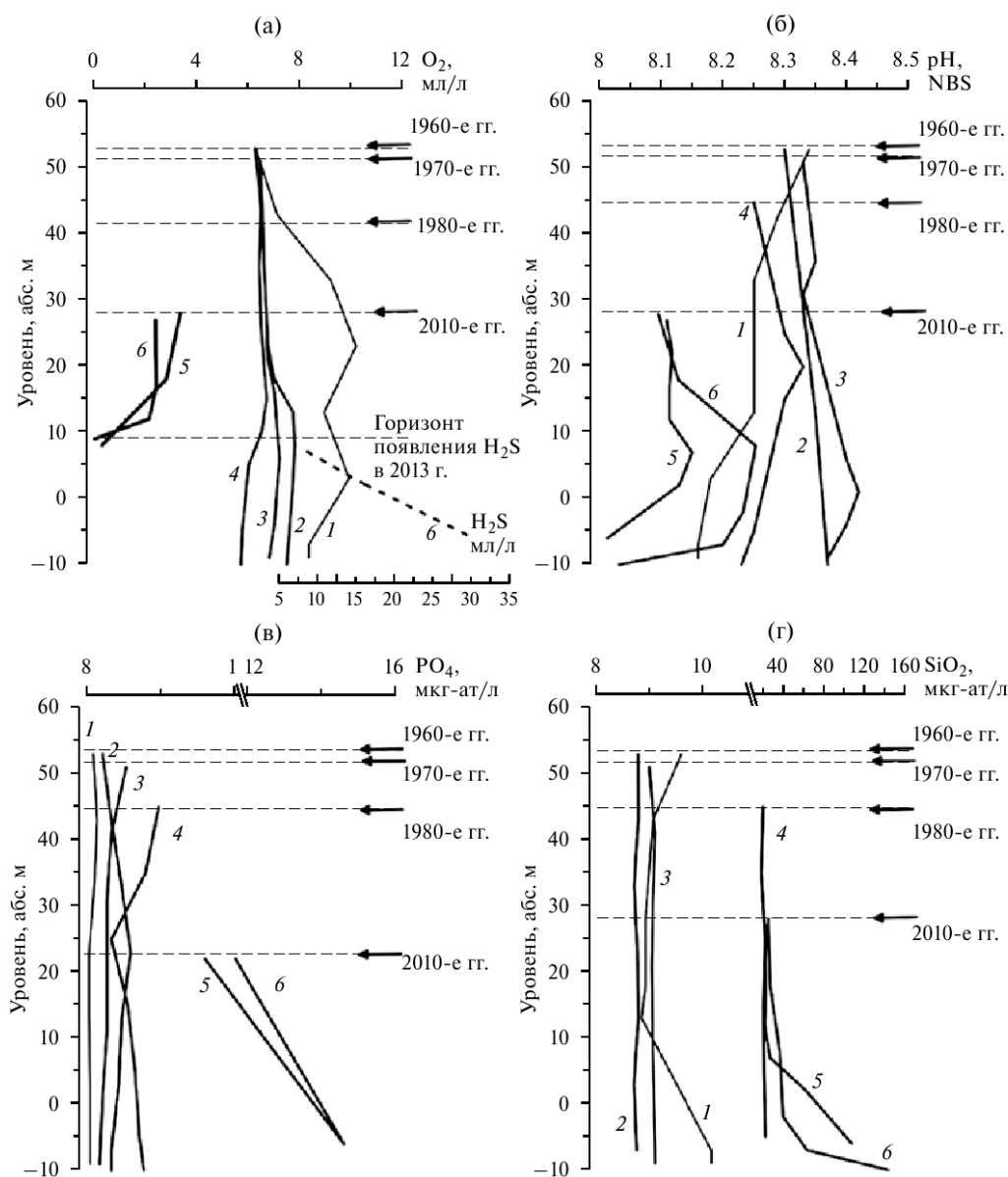
содержания взвешенных форм металлов на поверхности в 5 и более раз выше, чем по всему столбу воды. Объяснение этому – естественное влияние эолового переноса взвешенных частиц над акваторией водоема.

### МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИЙ СОЕДИНЕНИЙ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВОДАХ ЗАПАДНОГО АРАЛА

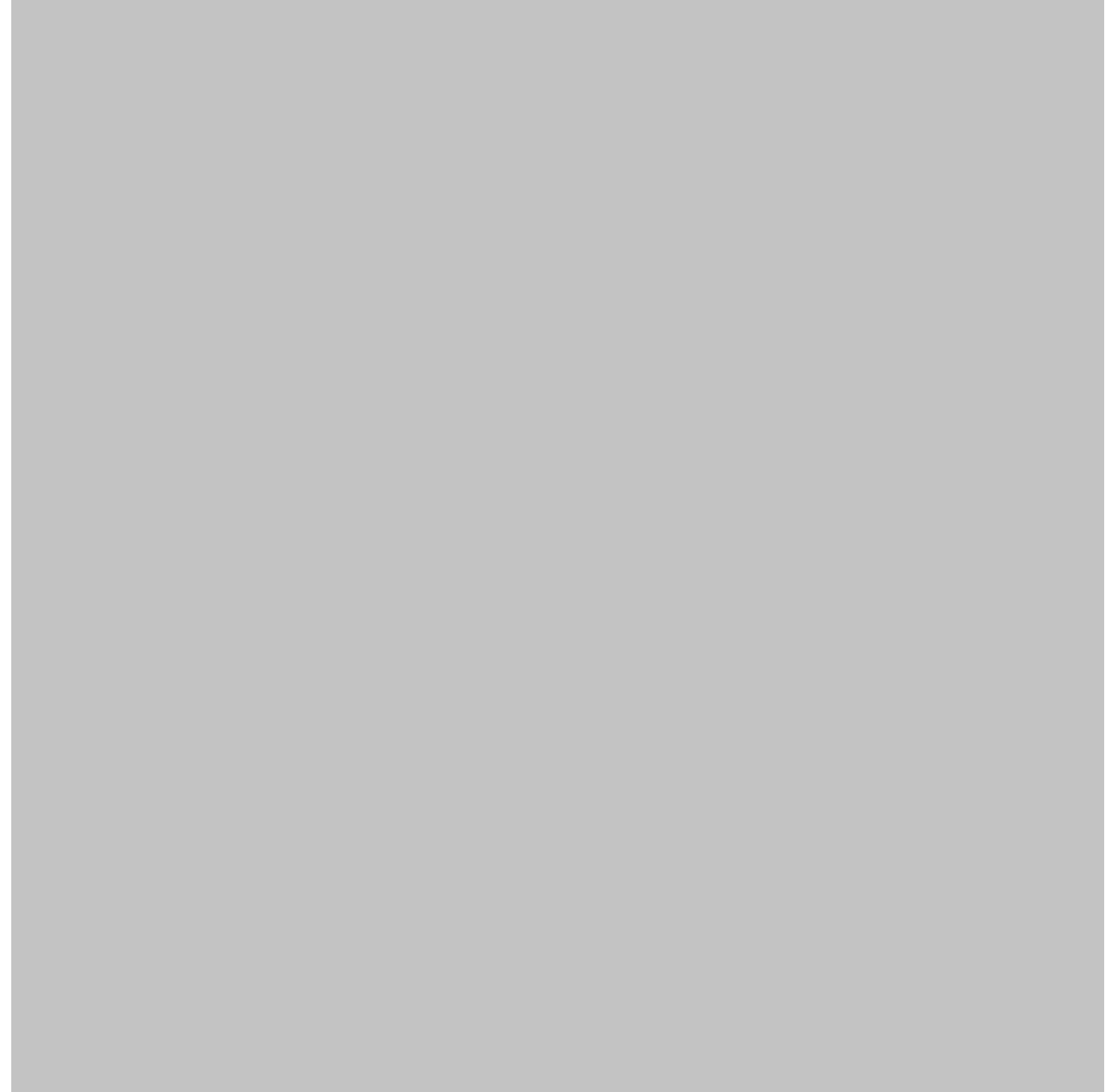
На рис. 5 показано вертикальное распределение гидрохимических параметров на наиболее глубоком участке западного бассейна Арала, которому примерно соответствует положение ст. А2. Данные

за 1950-е, 1960-е, 1970-е и 1980-е гг. взяты из работ [1, 3–5, 7] и из архива лаборатории биогидрохимии ИО РАН. Вертикальное распределение гидрохимических параметров за 2000-е гг. получено в ходе экспедиций ИО РАН.

Абсолютное содержание растворенного  $O_2$  снижалось по всему профилю начиная с 1950-х гг. (рис. 5а). Уменьшение содержания  $O_2$  до 1980-х гг. можно объяснить общим снижением биологической активности и деградацией морской экосистемы. По данным [7], дефицит  $O_2$  наблюдался в придонных водах западного Арала уже в 1960-х гг. Это связывают с ухудшением вентиляции глубинных вод и со снижением биомассы фитопланктона



**Рис. 5.** Распределение растворенного  $O_2$  и  $H_2S$  (а), pH (б), растворенного неорганического P (в), растворенного Si (г). 1 – 1950-е, 2 – 1960-е, 3 – 1970-е, 4 – 1980-е гг., 5 – 2012 г., 6 – 2013 г.



2. Большое Аральское море в начале XXI века: физика, биология, химия М.: Наука, 2012. 229 с.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 7. Аральское море / Под ред. Бортника В.Н., Чистяевой С.П. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 195 с.
4. Гусарова А.Н., Чернякова А.М., Вакуленко Н.В. Об основах создания банка гидрохимических данных Экологические системы и приборы. 2000. № 10. С. 34–37.
5. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 129 с.
6. Ефимов Н.Н. Об определении сухого остатка в солевой раппе // Изв. Ин-та физико-химического анализа. 1926. Т. 1. Вып. 2. 399 с.
7. Кукса В.И. Южные моря: Аральское, Каспийское, Азовское и Черное в условиях антропогенного стресса. СПб.: Гидрометеиздат, 1994. 320 с.
8. Ляхин Ю.И. О взаимосвязи между растворенным кислородом и карбонатной системой в водах океана // Обмен химическими элементами на границах раздела морской среды. М.: ИО АН СССР, 1981. С. 63–2.
9. Маккавеев П.Н., Стунжас П.А. Об измерении солености в гипергалинных водоемах на примере со-  
временного Аральского моря // Океанология. 2017. Т. 57. № 6. С. 990–996.
10. Методы гидрохимических исследований океана / Под ред. Бордовского О.К., Иваненкова В.Н. М.: Наука, 1978. 270 с.
11. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана / Под ред. Сапожникова В.В. М.: ВНИРО, 2003. 202 с.
12. Современные методы гидрохимических исследований океана / Под ред. Бордовского О.К., Иваненкова В.Н. М.: ИО АН СССР, 1992. 200 с.
13. Stiller M., Nissenbaum A. Geochemical investigation of phosphorus and nitrogen in hypersaline Dead Sea // Geochim. Cosmochim. Acta. 1999. V. 63. № 19/20. P. 3467–3475.
14. Strickland J.D., Parsons T.R. A Practical Handbook of Seawater Analysis // Bull. Fisheries Res. 1968. № 177. 203 p.
15. Wanklyn J.A. Water Analysis. London: Balantyne, Hanson & Co, 1907. 239 p.