

УДК 551.465

## ГЕОХИМИЯ ОСАДКОВ СОВРЕМЕННОГО АРАЛЬСКОГО БАССЕЙНА

© 2015 г. Г. Н. Батури<sup>1</sup>, П. О. Завьялов<sup>1</sup>, Я. Фридрих<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова, Москва, Россия  
e-mail: gbatur@ocean.ru<sup>2</sup>Институт прибрежных исследований, Центр Гельмгольца, Германия

Поступила в редакцию 18.11.2013 г., после доработки 21.05.2014 г.

Впервые за время изучения системы усыхающего Аральского моря выполнено детальное геохимическое исследование донных отложений и выявлены различия в составе осадков полноводной и регрессивной стадий бассейна. Установлены черты сходства и различия в элементном составе осадков прежней основной акватории, современной сокращенной основной акватории, зоны осушки, взвеси Аму-Дарьи и среднего состава глинистых пород осадочной оболочки Земли. В осадках зараженной сероводородом западной глубоководной впадины происходит заметная концентрация органического вещества, урана и молибдена. Интенсивное осаждение солей происходит в наиболее мелководной части моря и в западной впадине. Осолоненные осадки, обнажающиеся при отступании моря, обессоливаются в результате интенсивного выветривания. Повышенное содержание ртути, установленное во взвеси прежней полноводной Аму-Дарьи, в морских осадках не фиксируется в связи с прекращением речного стока и, возможно, миграцией ртути в атмосферу. Низкое содержание большинства микроэлементов в мелководных соляных отложениях позволяет предположить, что некоторые из них накапливаются, наряду с ураном, в морской воде.

DOI: 10.7868/S0030157415020021

Усыхающий бассейн, бывший ранее Аральским морем, превратился за последние годы в отдельные водоемы (рис. 1) в связи с резко сократившимся стоком реки Сыр-Дарьи, впадающей в Малый Арал, и полностью прекратившимся стоком Аму-Дарьи, впадавшей ранее в Большой Арал.

Этот бассейн, обладавший до середины прошлого века значительными рыбопромысловыми ресурсами, привлекал к себе внимание многих исследователей, изучавших особенности водного режима, биологии и осадконакопления Арала.

Первые сведения по этим вопросам были получены в конце 19 и в начале 20 века, что описано в капитальной монографии Берга [7], а также в ряде статей, опубликованных в Трудах Туркестанского отделения Императорского Русского географического общества. В советское время изучение осадков и гидрологии Аральского моря продолжалось [8, 9, 21–24, 28–31], а в последние годы возобновилось на базе новых материалов [14–20, 25–27, 32, 33, 36–38], но при этом данные о содержании микроэлементов в составе осадков ограничивались отдельными элементами, за исключением урана, геохимия которого была рассмотрена в работах [3, 23, 32, 33].

В настоящее время, когда большая часть бывшей площади моря превращается в осолоненную пустыню, возникли экологические проблемы, связанные, в частности, с изменением состава воды и донных осадков, которые экспонируются, усыхают и выветриваются при дальнейшем со-

кращении площади бассейна, превращающейся в арену песчаных бурь [11, 14].

Для рассмотрения вопроса о том, как изменился состав осадков при усыхании моря, нами выполнено сравнительное исследование двух типов образцов: а) полученных нами ранее со дна полноводного Большого Арала и б) собранных в последние годы со дна остаточного бассейна. Фрагмент этой работы был доложен на Международной научной конференции в Москве в 2013 г. [6].

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материал для исследования получен в экспедициях разных лет. Осадки полноводного Большого Арала собраны первым автором в геологической экспедиции Всероссийского Института минерального сырья (1965 г.) при содействии Аральского отделения Казахского научно-исследовательского института рыбного хозяйства (КазНИИРХ), предоставившего в наше распоряжение катер “Олег Кошевой”. Осадки отбирали с борта катера малым дночерпателем (25 × 20 см) вручную с помощью капронового линия. Образец среднего состава взвеси Аму-Дарьи был передан в наше распоряжение Ю.А. Судаковой (ГОИН).

Современные прибрежные и мелководные морские отложения с глубины 2 м и 7 м были собраны П.О. Завьяловым и его сотрудниками в экспедиции ИО РАН 2010 г. Колонка глубоководного осадка (около 30 см) со дна глубоководной

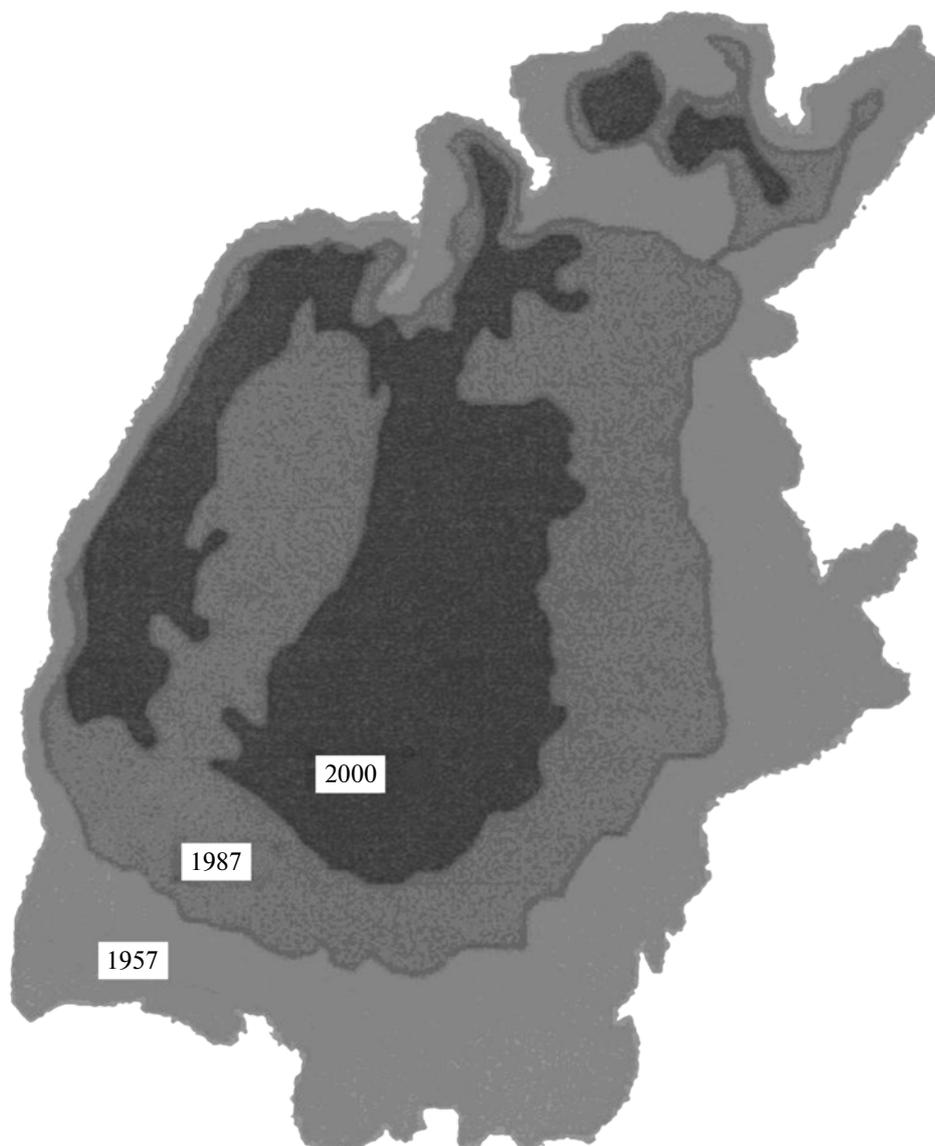


Рис. 1. Изменение площади моря по мере его усыхания к 2000 г.

впадины в западной части моря получена с помощью прямооточной трубки Я. Фридрих в экспедиции 2004 г. [32, 33].

Элементный состав материала определяли в Аналитическом сертификационном испытательном центре ИПТМ РАН методом ИСП–МС в с контролем результатов по стандартам СГД-1А (ГСО 521-84П) и СГД-2А (ГСО 8470-2005) под руководством В.К. Карандашева. Определение органического и карбонатного углерода выполнено Н.П. Толмачевой (ИО РАН) химическим методом. Определение общего кремнезема выполнено Е.О. Золотых (ИО РАН) микрохимическим методом, разработанным А.Б. Исаевой.

В связи с тем, что материал для разных видов анализов брали из разных навесок, а такие значи-

мые для соленосных отложений элементы как га-логены мы не анализировали, полученные данные по основному составу осадков, видимо, не являются окончательными.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты определения основного химического состава материала представлены в табл. 1, которая состоит из двух частей: в левой части приведены данные по составу взвеси и осадков, относящихся к периоду действующего речного стока, а в правой части — по составу материала, сформировавшегося в последние годы тотального обмеления бассейна. В таблицу включены также данные о среднем составе глинистых осадочных пород Зем-

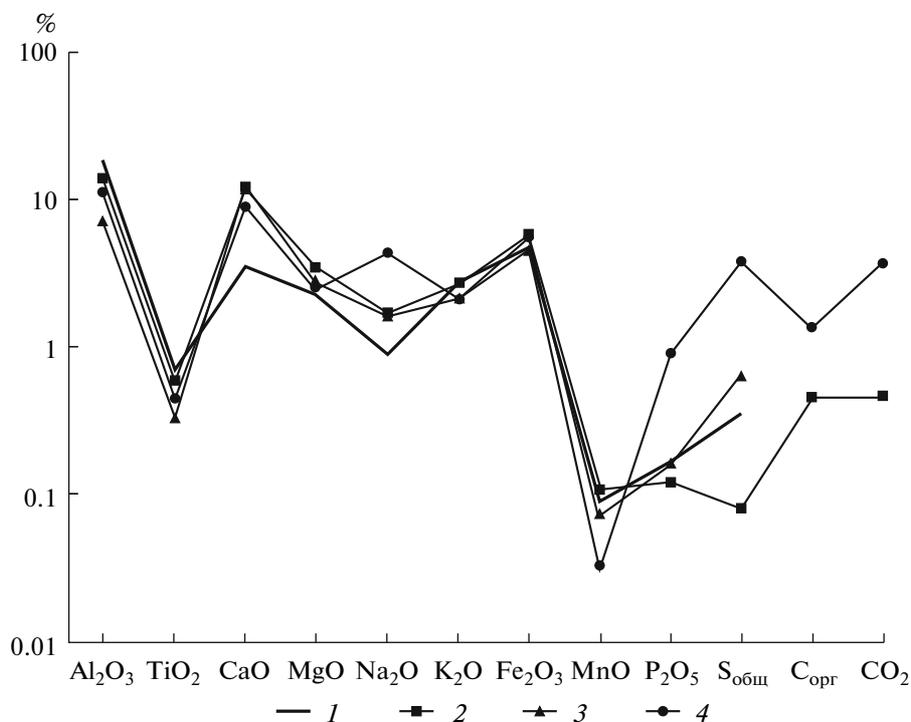
**Таблица 1.** Содержание макроэлементов в осадках до и после прекращения речного стока (%)

Элемент	Полноводный Арал				Усыхающий Арал			
	речная взвесь	морские осадки	впадина, низ	кларк	берег	глубина 7 м	впадина, верх	глубина 2 м
SiO <sub>2</sub>	21.9	21.3	20.5	57.5	18.8	16.6	13.6	(0.3)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.3	19.3	11.4	18	6.7	7.1	5.3	0.11
TiO <sub>2</sub>	0.6	0.43	0.44	0.72	0.32	0.31	0.18	0.006
CaO	12.2	12.7	9.2	3.5	17.1	15.0	14.5	37.8
MgO	3.3	2.8	2.5	2.3	4.1	3.0	3.3	0.80
Na <sub>2</sub> O	1.5	1.6	4.4	0.9	3.6	6.1	9.5	1.4
K <sub>2</sub> O	2.5	2.05	2.1	2.75	1.85	1.6	1.4	0.78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.3	4.7	5.7	4.75	3.15	1.6	2.2	0.08
MnO	0.105	0.082	0.045	0.09	0.04	0.03	0.026	0.03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.125	0.17	0.09	0.17	0.11	0.077	0.13	0.030
S <sub>общ</sub>	0.08	0.64	1.8	0.36	3.1	6.9	3.8	18.2
C <sub>орг</sub>	0.45	1.22	1.33	—	0.41	0.48	2.75	0.39
C <sub>мин</sub>	8.7	3.7	3.8	—	13.6	6.6	8.7	2.85

ли (кларки) по данным [12]. Соответственно, по такому же типу составлены таблицы 2 и 3, в которых приведены результаты определения макроэлементов и отдельно – редкоземельных элементов (РЗЭ).

#### Макроэлементы

Рассмотрение и сопоставление средних величин макроэлементного состава взвеси Аму-Дарьи, осадков полноводного моря и осадочных пород показывает следующее (табл. 1, рис. 2):

**Рис. 2.** Схема распределения макроэлементов в осадках полноводного моря.

1 – Среднее в глинистых породах [12], 2 – взвесь Аму-Дарьи, 3 – осадки основной акватории полноводного моря, 4 – осадки нижней части колонки из впадины.

Таблица 2. Распределение микроэлементов (г/т) в осадках до и после прекращения речного стока

Элемент	Осадки породы	До сокращения стока			После прекращения стока			
		речная взвесь	осадки 1965 г.	впадина, низ	побережье	глубина 7 м	впадина, верх	глубина 2 м
Hg	0.068	0.37	0.13	0.02	0.03	0.017	0.018	0.006
Ag	0.2	0.12	0.07	0.045	0.20	0.057	<0.02	<.02
Bi	0.3	0.36	0.27	0.23	0.19	0.16	0.07	<.01
Cd	0.3	0.22	0.14	0.12	0.13	0.05	0.17	<.03
Ta	1.4	0.76	0.61	0.64	0.36	0.36	0.19	<.04
Sb	1.5	1.5	1.7	1.4	0.58	0.70	0.83	<.06
W	1.8	1.8	1.5	2.2	1.45	0.90	0.70	<.02
Mo	2	1.2	1.6	15.5	3.0	2.7	51.5	0.21
Be	3	2.0	1.5	1.3	1.0	1.1	0.45	0.12
U	3.2	2.5	4.7	5.6	3.4	3.1	10.1	2.6
Sn	3.5	2.6	1.5	1.6	1.05	0.92	0.52	<.14
Hf	4.5	2.2	1.7	2.6	1.3	1.7	0.78	<.04
Cs	5	5.9	5.8	6.6	3.0	3.3	2.3	.049
Th	10	10	8.1	8.5	5.0	4.8	2.2	0.10
Nb	11	5.7	7.2	9.0	4.4	5.6	2.5	0.16
As	13	17	38	24.8	9.7	8.9	5.8	1.2
Sc	13	14.4	12	9.4	6.2	7.5	4.0	<0.3
Ga	19	11.5	13.7	15.3	7.2	8.5	5.1	<.05
Co	20	16	19.5	15.7	8.7	7.6	6.3	1.1
Pb	20	19.6	15.1	19	11.8	10.1	7.1	0.24
Y	26	19	13	15.7	10.1	10.1	4.9	0.8
La	32	25	22.5	26	14.8	13.1	6.9	0.74
Cu	45	37	22.4	19.8	15	14.2	15	<0.9
Li	46	40	46.5	42.6	27.2	31.5	25.5	1.5
Ni	62	47.3	36.6	33.9	25	23.3	22.5	7.2
Zn	70	95	86	65.2	45.7	43.9	31.7	3.5
Cr	100	89	75	79	38	37.2	29.6	<0.9
V	130	100	106	146	57	55	51	<0.6
Rb	140	96	78.5	89.4	45	43	28	1.1
Zr	160	79	55	95	44	55	25	2.7
Sr	240	245	893	1163	1050	1782	4527	5300
Ba	510	400	480	376	307	230	174	79

А. Во время полноводного периода макроэлементный состав осадков основной акватории был близок к составу речной взвеси, за исключением того, что осадки были в восемь раз богаче серой (0.64 против 0.08%) и почти в три раза богаче органическим углеродом (1.22% против 0.45%), но в два с лишним раза беднее карбонатным углеродом (3.7% против 8.7%). Видимо, это отражает влияние биопродуктивности водоема на формирование состава осадков.

Осадки западной впадины (нижний горизонт колонки, 22–24 см) были заметно беднее алюминием, кальцием, марганцем и фосфором, но богаче серой и натрием в два–три раза. При этом все три типа этого материала существенно обеднены относительно среднего состава глинистых пород мира кремнеземом, алюминием и титаном, но обогащены кальцием и натрием при сопоставимом содержании прочих микроэлементов.

Таблица 3. Содержание редкоземельных элементов в осадках и взвеси, г/т

элемент	До прекращения стока рек				После прекращения стока рек					
	взвесь Аму-Дарьи	осадки 1965 г.		впадина, низ	берег		берег 8–10 см	море 7 м	впадина, верх	шельф 2 м
		ст. 9	ст. 73		0–2 см					
La	25.1	26.7	18.5	26.0	15.1	14.5	13.1	6.9	0.74	
Ce	50.9	54.9	37.0	57.4	32.1	30.9	27.1	14.4	1.4	
Pr	5.8	6.5	4.4	6.1	3.6	3.8	3.1	1.6	0.15	
Nd	21.8	25.0	16.9	24.8	13.8	13.8	12.6	6.3	0.61	
Sm	4.3	4.9	3.2	4.7	2.7	2.8	2.5	1.2	0.13	
Eu	0.85	1.0	0.63	1.0	0.64	0.63	0.49	0.26	<0.004	
Gd	4.0	4.2	2.9	4.1	2.6	2.6	2.4	1.1	0.15	
Tb	0.63	0.65	0.43	0.60	0.39	0.40	0.34	0.17	0.018	
Dy	2.7	3.3	2.3	3.48	2.1	2.0	2.0	0.98	0.069	
Ho	0.57	0.68	0.47	0.67	0.42	0.39	0.38	0.20	0.023	
Er	1.8	1.9	1.3	1.9	1.2	1.2	1.1	0.56	0.064	
Tm	0.22	0.28	0.19	0.29	0.18	0.17	0.16	0.084	0.088	
Yb	1.5	1.9	1.3	1.9	1.2	1.2	1.1	0.56	0.052	
Lu	0.23	0.29	0.20	0.27	0.17	0.17	0.15	0.078	0.088	
$\sum$ TR	114.44	128.95	88.92	133.21	75.20	74.56	67.12	34.39	3.60	
Ce*	0.93	0.94	0.89	1.0	0.96	0.93	0.92	1.0	0.90	
Eu*	0.89	0.97	0.91	1.0	1.05	1.08	0.88	1.0	–	

Примечание. Ce\* и Eu\* – величины аномалий.

**Б.** Через несколько лет после отступления моря состав осадков основной акватории изменился: содержание кремнезема, алюминия, титана, железа, калия, фосфора и углерода (органического и минерального) сократилось, а содержание кальция, магния, натрия и серы возросло.

При этом оказавшийся на берегу относительно свежий ил чрезвычайно близок по своему составу к осадку с глубины 7 м, за исключением того, что он относительно обеднен натрием и серой, но обогащен железом и минеральным углеродом.

Что касается глубоководной впадины, то в результате высыхания моря в составе ее осадков произошли еще более кардинальные изменения, включая сокращение содержаний кремнезема, алюминия, титана, калия, железа и марганца от полутора до двух раз и увеличение содержаний кальция, магния, натрия, серы, фосфора и обеих форм углерода от полутора до двух с половиной раз.

Таким образом, ни один из 13 рассматриваемых макроэлементов не сохранил своей прежней позиции в составе осадка, сформировавшегося в полномодном бассейне.

Что касается соленосного тонкодисперсного осадка с глубины около 2 м, то он почти целиком состоит из гипса и мирабилита при содержании СаО 37.8%, общей серы 18.2% и суммы оксидов

натрия, магния и калия 3%, что приближается к 100% при пересчете серы на SO<sub>4</sub>. Количество литогенных компонентов составляет в этом материале, судя по полученным данным, около 1%.

#### Микроэлементы

**А.** Содержание микроэлементов в осадках полномодного бассейна также было сопряжено с составом речного стока, который оказался чрезвычайно близок к среднему составу взвесей рек мира и осадочных пород в целом (табл. 2, рис. 3). Единственным элементом с относительно повышенной концентрацией в речной взвеси была ртуть, содержание которой (0.37 г/т) в пять раз выше по сравнению со средней величиной в осадочных породах (0.07 г/т) [12].

Сопоставление среднего состава взвеси и осадка основной акватории показывает, что в осадках относительно накапливались только три элемента: уран и мышьяк – в два раза и стронций – в три раза относительно кларка.

В осадках глубоководной впадины происходило активное накопление (по сравнению с осадками основной акватории) молибдена (в 10 раз) и относительно слабое – урана, свинца, ванадия и стронция.

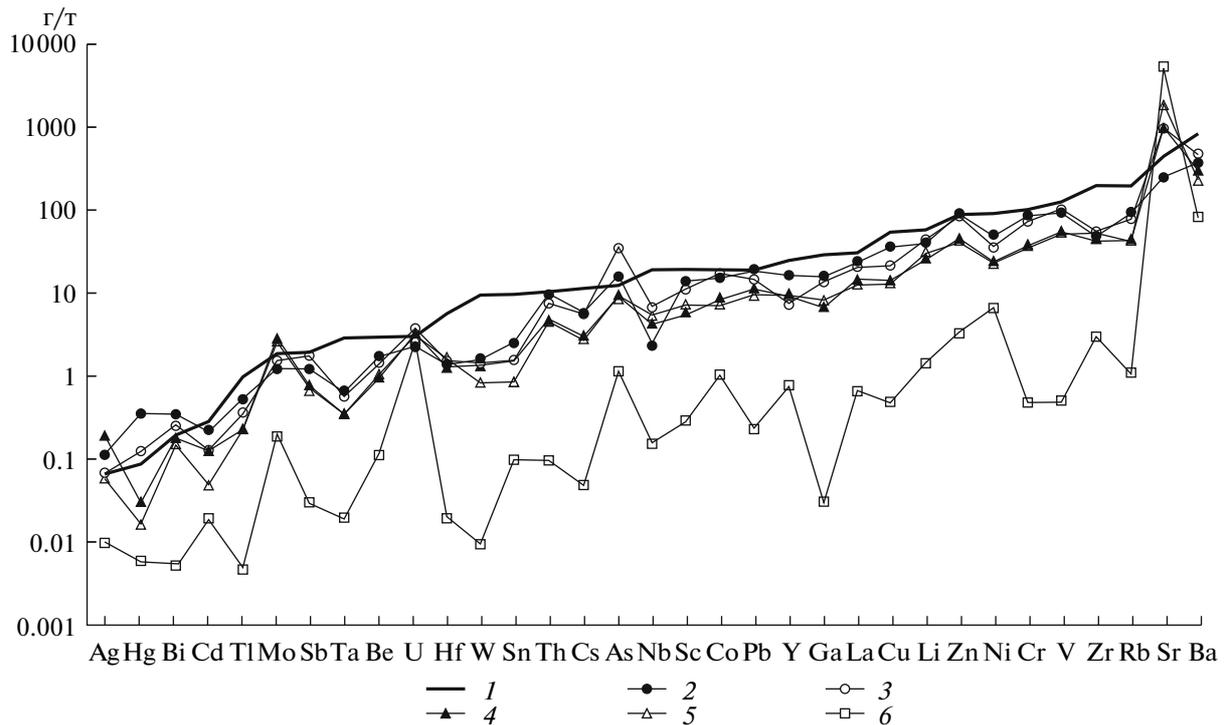


Рис. 3. Схема распределения микроэлементов в осадках.

1 – Среднее содержание в глинистых породах [12], 2 – взвесь Аму-Дарьи, 3 – осадки моря в 1965 г., 4 – современный высыхающий ил на берегу, 5 – современный ил с глубины 7 м, 6 – соляной осадок с глубины 2 м.

**Б.** По мере усыхания бассейна микроэлементный состав осадков также существенно меняется.

При сопоставлении состава осадков прежней основной акватории и исследованных современных осадков с глубины 7 м оказывается, что последние в той или иной мере обеднены всеми элементами, за исключением молибдена, содержание которого незначительно увеличилось (от 1.6 до 2.7 г/т), а также гафния и циркония, содержание которых осталось на прежнем уровне. Наиболее резко сократилось содержание ртути (в восемь раз), а также кадмия и мышьяка (в три–четыре раза). Содержание прочих микроэлементов уменьшилось в 1.3–2 раза.

В осадках глубоководной впадины резко возросло содержание молибдена (до 51.5 г/т), урана (до 10 г/т) и стронция (до 4527 г/т), а содержание прочих элементов осталось неизменным или понизилось незначительно.

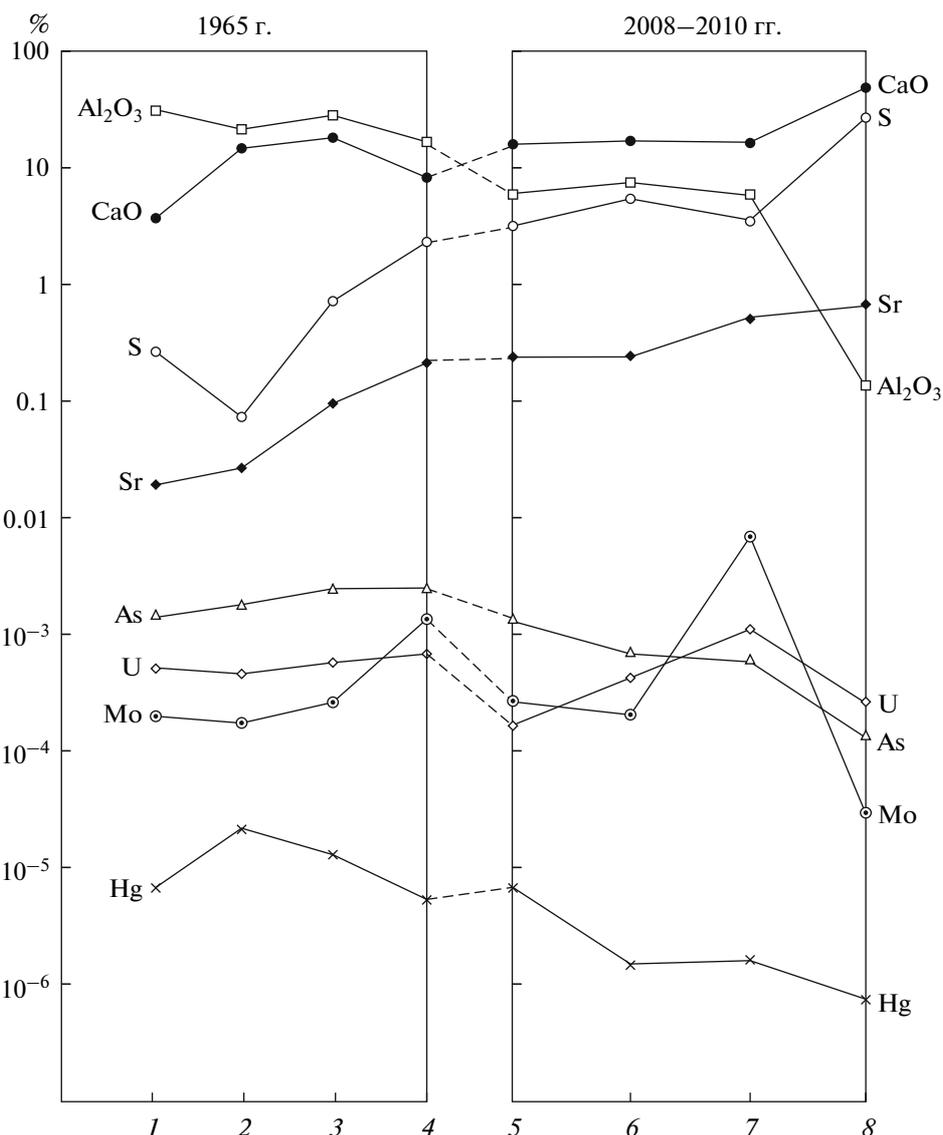
В осадке с глубины 2 м, в котором доминирует хемогенный гипс, содержание стронция достигает максимальной величины (5300 г/т) по сравнению с остальными рассматриваемыми отложениями, что, видимо, связано с осаждением стронцианита. Содержание урана лишь немного ниже, чем в обычном осадке с глубины 7 м (соответственно 3.1 и 2.6 г/т), что свидетельствует о частичном соосаждении растворенного в воде ура-

на совместно с гипсом, мирабилитом и стронцианитом.

Ряд других элементов (As, Hg, Mo, Ni, Zn) присутствует в солевом осадке в количестве большем, чем позволяет их количество в мизерной доле рассеянного в солях литогенного материала, что также вызывает предположение об их частичном соосаждении из морской воды. В связи с этим возникает вопрос о содержании и формах нахождения в водах Арала целой серии не исследованных до настоящего времени микроэлементов.

В отложениях зоны осушки содержание всех микроэлементов сопоставимо не с прибрежным хемогенным осадком, а с шельфовым терригенным илом с глубины 7 м. Разница между их составами сводится лишь к тому, что ил на берегу богаче морского ила серебром, кадмием и ртутью в два–три раза и лишь незначительно обеднен (до полутора раз) малоподвижными элементами – цирконием, гафнием, ниобием, а также стронцием.

Логично предположить, что по мере отступления моря на суше должен остаться наиболее мелководный прибрежный соленосный осадок. Но этот пелитоморфный материал оказывается слишком эфемерным, и будучи экспонированным в условиях знойного сухого лета и сильных ветров, быстро высыхает и развевается в виде соляной пыли, в то время как влажный вязкий глинистый



**Рис. 4.** Сопоставление распределения в осадках некоторых элементов до и после усыхания моря.

1 – Среднее содержание в глинистых породах, 2 – взвесь Аму-Дарьи, 3 – осадки основной акватории (1965 г.), 4 – нижняя часть колонки из впадины, 5 – ил в зоне современной осушки, 6 – верхняя часть колонки из впадины, 7 – современный осадок с глубины 7 м, 8 – соленосный осадок с глубины 2 м.

ил, покрывающий значительные пространства бывшего морского дна, ветру не подвластен.

Фрагмент общей картины распределения нескольких элементов в осадках до и после прекращения речного стока представлен на рис. 4, демонстрирующем, совместно с рис. 3, черты сходства и различия шести типов осадочного материала:

1) взвесь Аму-Дарьи близка по составу к осадкам Большого Арала 1965 г.;

2) современный ил Большого Арала с глубины 7 м близок по своему составу к обессоленному илу на суше вблизи моря;

3) обе пары отложений сходны между собой по составу и характеру распределения большинства микроэлементов;

4) лидирующим по повышенному содержанию элементов в рассматриваемом комплексе отложений является средний состав глинистых пород, за исключением шести элементов – серебра, ртути, висмута, молибдена, мышьяка и стронция;

5) минимальное содержание всех микроэлементов, кроме стронция и урана, наблюдается в солевом осадке.

В солевом осадке, являющемся конечным продуктом усыхания аральской воды, стронций

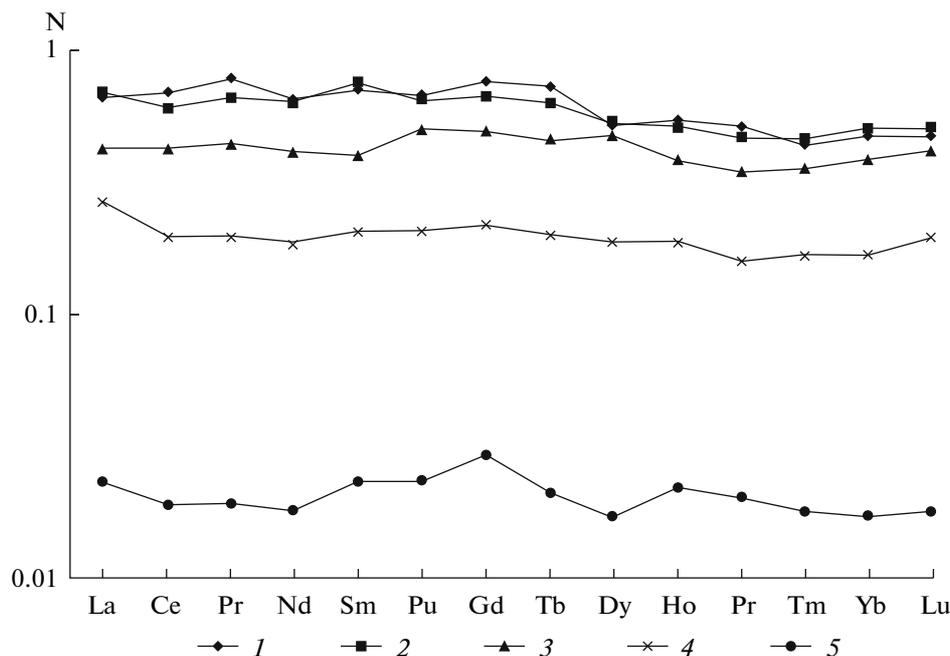


Рис. 5. Схема распределения редкоземельных элементов в осадках.

1 – Взвесь Аму-Дарьи, 2 – осадки основной акватории (1965 г.), 3 – ил из зоны современной осушки, 4 – верхний горизонт из глубоководной колонки, 5 – соленосный осадок с глубины 2 м.

входит в состав арагонита и стронцианита, а форма нахождения урана не установлена.

Наименее подвижные элементы (тантал, бериллий, гафний, вольфрам, ниобий, галлий, цирконий) присутствуют в солевом осадке в следовых количествах и находятся в составе тонкодисперсного литогенного материала.

#### Редкоземельные элементы (РЗЭ)

В распределении РЗЭ наблюдаются следующие тренды.

Максимальное содержание, немного уступающее фоновому для осадочных пород, характерно для речной взвеси, а также для осадков полноводного моря, включая нижний горизонт колонки из глубоководной впадины (табл. 3).

В зоне современной осушки и в современном осадке на глубине 7 м содержание РЗЭ понижается вдвое. В осадке верхнего горизонта глубоководной колонки содержание РЗЭ дополнительно понижается вдвое, а в осолоненном осадке прибрежного мелководья падает до минимальной величины суммы РЗЭ – 3.764 г/т.

При сопоставлении концентрации РЗЭ в осадках полноводного моря и в современных осадках с глубины 7 м также фиксируется обеднение последних примерно вдвое – как и для многих других рассмотренных выше микроэлементов.

Величины цериевой и европиевой аномалий, рассчитываемые как отношение нормализованных по сланцам содержаний церия и европия к полусумме нормализованных по сланцам содержаний двух соседних элементов [13, 34], оказываются довольно однородными. Во взвеси Аму-Дарьи обе величины слабо отрицательны: 0.93 и 0.89. В верхнем и нижнем горизонтах колонки глубоководных осадков обе величины нейтральны (1.0). В отложениях прибрежной осушки цериевая аномалия слабо отрицательна (0.93–0.96), а европиевая слабо положительна (1.05–1.08). Во всех остальных образцах обе аномалии слабо отрицательны.

Примечательно то, что характер распределения РЗЭ во всех рассматриваемых образцах исключительно однороден (рис. 5), что свидетельствует об унаследованности их состава от речной взвеси.

В целом полученные результаты показывают, что в полноводном бассейне состав осадков контролировался преимущественно речным стоком и уровнем биопродуктивности, о чем свидетельствует повышенное относительно речной взвеси содержание в осадках  $C_{орг}$ , фосфора и серы. Наряду с этим, о влиянии также эолового фактора свидетельствует повышенное содержание в осадках алюминия.

Содержание большинства микроэлементов в осадках полноводного бассейна было ранее (до начала активного усыхания моря) понижено от-

носителем речной взвеси в связи с влиянием как биогенного, так и эолового факторов. Исключением является обогащение осадков молибденом, ураном, мышьяком и стронцием, видимо, в связи с их дополнительной поставкой реками в растворенной форме во время существования полноводного моря.

После прекращения речного стока возросла роль эолового материала и началось накопление осадков с пониженным содержанием Al, Ti, K, Fe, Mn, P и  $C_{орг}$ , а также почти всех микроэлементов, за исключением молибдена и стронция, содержание которых повысилось в 1.5–2 раза, вероятно, за счет осаждения из морской воды.

На дне глубоководной впадины происходило то же: содержание большинства микроэлементов понизилось по сравнению с полноводным периодом от 1.5 до 4 раз, за исключением молибдена, урана и стронция, концентрация которых составляет соответственно 51.5 г/т (Mo), 10.1 г/т (U) и 4327 г/т (Sr). По сравнению с осадком основной акватории эти величины выше соответственно в 19, в 2 и в 2.5 раза.

Заключительным этапом процесса является формирование соленосных отложений (наш образец с глубины 2 м), осаждающихся из относительно тонкого интенсивно испаряющегося слоя прибрежной воды и состоящих преимущественно из гипса, стронцианита и мирабилита.

Поведение урана в современном Арале заслуживает особого внимания.

Первое сообщение о его содержании в воде (около 15 мкг/л) появилось в 1963 г. [10]. Затем (в 1965 г.) нами было установлено, что это содержание в несколько раз выше (30–60 мкг/л) [3, 23]. Тогда же было выполнено первое исследование изотопного состава урана в осадках для определения абсолютного возраста моря [31].

По последним данным [32, 33], в водах Сыр-Дарьи содержание урана составляет 16 мкг/л при минерализации 1.45 г/кг, в водах Малого Арала (питающего водой Большой Арал) эти цифры повышаются до 35 мкг/л и 18 г/кг, а в водах Большого Арала — до 154 мкг/л и 110 г/кг. При этом отношение U (мкг)/соленость (г) в этом ряду составляет, соответственно, 11 – 2 – 1.5, т.е. осолонение морской воды происходит интенсивнее, чем обогащение ее ураном — главным образом за счет испарения.

Накоплению урана в морской воде способствует то, что в пределах современной основной акватории он не осаждается и его содержание в донных осадках не увеличивается по сравнению с полноводной стадией истории моря, оставаясь на том же уровне, что и 50 лет назад. Но знаменательны два других факта:

А) В составе солей, осаждающихся из аральской воды на мелководье, уран присутствует в концентрации, сопоставимой с обычными осадками, в отличие от большинства других элементов (кроме кальция, серы и стронция).

Б) В современных осадках глубоководной впадины, где вода заражена сероводородом, уран накапливается в настоящее время в обогащенном органическим веществом современном осадке до  $10 \times 10^{-4} \%$ , что в два раза выше, чем в осадке из той же впадины, отложившемся во время полноводного периода. При этом содержание  $C_{орг}$  в современном осадке также возросло в два раза.

Из этого следует, что наряду с накоплением растворенного урана в водах Аральского моря происходит локальное осаждение этого элемента в двух ситуациях: а) в обогащенных органикой осадках глубоководной впадины в условиях сероводородного заражения (как в норвежских фиордах [35]) и б) в солевых эвапоритах прибрежной зоны.

По-видимому, осаждению урана из аральской воды препятствует форма его нахождения в виде комплекса уранил-иона с гидроксил-ионами при высоком рН аральской воды [32, 33]. К сожалению, сведения о содержании и формах нахождения других металлов в аральской воде пока отсутствуют, но можно предположить, что наряду с ураном в этой воде могут накапливаться и другие элементы.

Как видим, сопоставление поведения большой группы элементов в двух различных обстановках представляет довольно сложную картину, о чем свидетельствует график распределения восьми представительных макро- и микроэлементов в двух ситуациях — в полноводном и усыхающем Аральском море (рис. 4).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что усыхание Аральского моря, вызванное резким сокращением речного стока, привело к кардинальному изменению существовавшего ранее режима седиментации и геохимии донных отложений, что происходило параллельно с осолонением воды и сокращением биопродуктивности.

В основном химическом составе осадков акватории резко понизилось содержание алюминия и органического углерода, заметно сократилось содержание кремнезема, титана, калия, железа, марганца и фосфора, но повысилось содержание кальция, натрия и серы. Аналогичные изменения произошли в составе осадков глубоководной впадины, но в отличие от основной акватории, в глубоководных осадках увеличилось содержание органического углерода. Одновременно с этим в зоне прибрежного мелководья сформировался пояс

соленосных отложений, состоящих преимущественно из гипса и мирабилита.

Сопоставление основного и микроэлементного состава донных отложений Аральского моря позволяет сделать следующие выводы:

1. Взвесь Аму-Дарьи, впадавшей ранее в Аральское море, была близка по составу к осадкам основной акватории как до обмеления бассейна, так и в настоящее время.

2. В прибрежной мелководной зоне современного усыхающего бассейна на глубине порядка первых метров происходит осаждение соли (преимущественно гипса и мирабилита).

3. В составе осажженной соли присутствует уран, что свидетельствует о его частичном осаждении из мелководного рассола. Прямые свидетельства осаждения из рассола других элементов не обнаружены.

4. По мере усыхания моря одновременно с возрастающей общей минерализацией воды в ней могут накапливаться наряду с ураном и другие элементы.

5. Соль, экспонированная при отступании моря, быстро выветривается и на берегу остается высыхающий ил, близкий по составу к обычным морским осадкам.

6. Обмеление моря сопряжено с развитием сероводородного заражения глубинных вод во впадине, что способствовало накоплению органического вещества, урана и молибдена в верхнем слое осадка.

7. Последнее обстоятельство свидетельствует о том, что глубоководная впадина Аральского моря является новой разновидностью современного сероводородного и вдобавок осолоненного бассейна, генерирующего углеродистые металлоносные отложения, что имеет место также в фиордах Норвегии, в Черном и Балтийском морях [1–5].

8. В связи с тем, что описанные результаты базируются на материалах анализа единичных образцов, для получения детальной и количественной картины процессов современного осадконакопления и соленакопления на дне Арала и выветривания его экспонированных отложений на берегу требуются дополнительные системные исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программ № 23 Президиума РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батулин Г.Н. К вопросу о геохимии урана в Балтийском море // Геохимия. 1968. № 3. С. 377–385.
2. Батулин Г.Н. Уран в процессе осадкообразования в Черном и Азовском морях // Литология и полезные ископаемые. 1973. № 5. С. 21–30.
3. Батулин Г.Н. Уран в современном морском осадкообразовании. М.: Атомиздат, 1975. 150 с.
4. Батулин Г.Н. Геохимия черноморских сапропелевых илов // Геохимия. 2012. № 5. С. 556–561.
5. Батулин Г.Н., Емельянов Е.М. Микроэлементы в углеродистых осадках Балтийского моря // Океанология. 2012. Т. 52. № 4. С. 539–546.
6. Батулин Г.Н., Завьялов П.О., Фридрих Я. Геохимия осадков современного Аральского бассейна // Материалы XX Междунар. Конференции по морской геологии. М.: ГЕОС, 2013. Т. 3. С. 293–297.
7. Берг Л.С. Аральское море. Опыт физико-географической монографии // Изв. Туркест. отд. русского геогр. общества. СПб., 1908. 580 с.
8. Бродская Н.Г. Донные отложения и процессы осадкообразования в Аральском море // Тр. ГИН. 1952. Т. 115. С. 80–94.
9. Бродская Н.Г. Аральское море // Образование осадков в современных водоемах. М.: Наука, 1954. С. 237–292.
10. Германов А.И. Уран в природных водах // Основные черты геохимии урана. М.: Изд. АН СССР. 1963. С. 290–336.
11. Григорьев А.А., Липатов В.Б. Динамика и очаг пылевых бурь в Приаралье по наблюдениям из космоса // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1982. № 6. С. 93–98.
12. Григорьев Н.А. Среднее содержание химических элементов в горных породах континентальной коры // Геохимия. 2003. № 7. С. 785–792.
13. Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. М.: Наука, 2006. 360 с.
14. Завьялов П.О. (ред.). Большое Аральское море в начале XXI века М.: Наука, 2012. 232 с.
15. Завьялов П.О., Андрулионис Е.Е., Арашкевич Е.Г. и др. Экспедиционные исследования в западном бассейне Аральского моря в сентябре 2005 г. // Океанология. 2008. Т. 48. № 4. С. 648–654.
16. Завьялов П.О., Арашкевич Е.Г., Грабовский А.В. и др. Квазисиноптические экспедиционные исследования в западном и восточном бассейнах Аральского моря (октябрь 2005 г.) // Океанология. 2006. Т. 46. № 6. С. 750–754.
17. Завьялов П.О., Арашкевич Е.Г., Бастида И. и др. Большое Аральское море в начале XXI века. М.: Наука, 2012. 229 с.
18. Завьялов П.О., Арашкевич Е.Г., Дикарев С.Н. и др. Мониторинг состояния физических, химических и биологических систем Аральского моря в условиях экологического кризиса // Современные проблемы аридных и полуаридных экосистем России. Ростов: ЮНЦ РАН, 2006. С. 529–652.
19. Завьялов П.О., Гинзбург А.И., Сапожников В.Ф. и др. Комплексные экспедиционные исследования в западной части Аральского моря в октябре 2003 г. // Океанология. 2004. Т. 44. № 4. С. 632–635.
20. Завьялов П.О., Костяной А.Г., Сапожников Ф.В. и др. Современное гидрофизическое и гидробиологическое состояние западной части Аральского моря // Океанология. 2003. Т. 43. № 2. С. 316–319.
21. Зенкевич Л.А. Аральское море // Биология морей СССР. М.: Изд. АН. С. 507–524.

22. *Зенкович В.П.* Донные отложения Аральского моря // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1947. Т. 22. Вып. 4. С. 39–59.
23. *Коченов А.В., Батурич Г.Н.* Распределение урана в осадках Аральского моря // Океанология. 1967. Т. 7. № 4. С. 623–630.
24. *Лубченко И.Ю., Туровский Д.С.* Распределение свинца в поверхностном слое осадков Аральского моря // Докл. АН СССР. 1976. Т. 226. № 1. С. 191–194.
25. *Орешкин В.Н., Хаитов И.Г., Рубанов И.В.* Кадмий в донных осадках Аральского моря // Водные ресурсы. 1993. Т. 20. № 3. С. 376–379.
26. *Рубанов И.В., Пинхасов В.И., Курбаниязов А.К.* Процессы соленакопления в акватории Аральского моря // Проблемы освоения пустынь. 1998. № 3–4. С. 31–37.
27. *Савенко В.С., Кулматов Р.А.* Микроэлементы в осадочном материале бассейна Аральского моря // Геохимия. 1997. № 11. С. 1161–1163.
28. *Симонов А.И.* Происхождение относительно высокосолёных вод западной впадины Аральского моря // Тр. ГОИН. 1962. Вып. 68. С. 103–107.
29. *Хрусталеv Ю.П., Резников С.А., Туровский Д.С.* Литология и геохимия донных осадков Аральского моря. Ростов-на-Дону, 1977. 159 с.
30. *Хрусталеv Ю.П., Резников С.А., Чернышев С.Я.* Литий, рубидий и цезий в донных осадках Аральского моря // Докл. АН СССР. 1975. Т. 222. № 1. С. 231–234.
31. *Чалов П.И., Меркулова К.И., Тузова Т.В.* Отношение  $U^{234}/U^{238}$  в водах и донных осадках Аральского моря и абсолютный возраст водоема // Геохимия. 1966. № 12. С. 1431–1442.
32. *Friedrich J.* Uranium contamination of the Aral Sea // J. Mar. Systems. 2009. V. 76. P. 323–335.
33. *Friedrich J., Oberhansli H.* Hydrochemical properties of the Aral Sea water in summer 2002 // J. Mar. Systems. 2004. V. 47. P. 77–88.
34. *Gromet L.P., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L.* The “North American shale composite”: Its compilation, major and trace element characteristics // Geochim. et cosmochim. acta. 1964. V. 64. № 12. P. 2469–2482.
35. *Strom M.A.* A concentration of uranium in black muds // Nature. 1948. V. 162. № 4128. P. 922.
36. *Zavjalov P.O.* Physical Oceanography of the dying Aral Sea. Springer Praxis Books, 2005. 140 p.
37. *Zavjalov P.O., Kostianoy A.G., Emelianov S.V.* Hydrographic survey in the dying Aral Sea // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. P. 1–4.
38. *Zavjalov P.O., Ni A.A.* Chemistry of the Large Aral Sea // The Handbook of Environmental Chemistry. 2010. № 7. P. 219–233.

## Geochemistry of Sediments in Recent Aral Basin

G. N. Baturin, P. O. Zavjalov, J. Friedrich

During the period of desiccating Aral Sea investigation, the present study is the first one dedicated to detailed geochemical investigation of bottom sediments revealing some similar or different features of elemental composition in sediments of previous major basin, recent basin, desiccation zone, Amu Darya suspensions, and average clay of the Earth crust. The sediments of  $H_2S$  – infected western trough accumulate organic matter, uranium and molybdenum; the active salt accumulation occurs in the shallowest part of the sea and in western trough. The salty sediments exposed after sea retreat are desalinated owing to extensive weathering. The high mercury content established in suspensions of full water of former Amu-Darja does not exist in recent marine sediments owing to cut off river flux and possible evaporation to the atmosphere. The low content of most microelements in shallow salty sediments may be related to their accumulation along with uranium in the sea water.