

УДК 550.452(477)

DOI: 10.15372/KhUR2021322

## Первые данные о распределении урана и тория в природных водах Байдарской долины (Крымский полуостров)

Д. А. НОВИКОВ<sup>1,2</sup>, Т. В. КОРНЕЕВА<sup>1</sup>, Ю. Г. КОПЫЛОВА<sup>3</sup>, А. В. ЧЕРНЫХ<sup>1</sup>, Ф. Ф. ДУЛЬЦЕВ<sup>1</sup>, А. А. ХВАЩЕВСКАЯ<sup>3</sup><sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск (Россия)

E-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

<sup>2</sup>Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск (Россия)<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск (Россия)

(Поступила 19.08.20; после доработки 06.10.20)

### Аннотация

Получены первые данные по распределению и формам миграции урана и тория в разных геохимических типах природных вод Байдарской долины (Крымский полуостров). В регионе развиты пресные и ультрапресные воды преимущественно гидрокарбонатного кальциевого состава с величиной общей минерализации от 208 до 1269 мг/дм<sup>3</sup>. Наиболее защищенные от антропогенного влияния и процессов континентального засоления трещинно-карстовые воды относятся к слабощелочным (рН 7.7), пресным с минерализацией 444 мг/дм<sup>3</sup> и невысоким содержанием Si – 2.23 мг/дм<sup>3</sup>, по составу – гидрокарбонатные кальциевые. Воды зоны региональной трещиноватости и трещинно-жильные подвержены влиянию процессов континентального засоления и антропогенной нагрузки. Они характеризуются рН от нейтральных до щелочных (7.1–8.6), преимущественно пресные (269–1269 мг/дм<sup>3</sup>), со средним содержанием Si 4.61–4.70 мг/дм<sup>3</sup>, по составу гидрокарбонатные кальциевые с повышенной долей SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Mg<sup>2+</sup> и Na<sup>+</sup>. Поверхностные воды подвержены влиянию процессов континентального засоления, слабощелочные (рН 8.3), умеренно пресные (207–364 мг/дм<sup>3</sup>), со средней концентрацией Si 1.18 мг/дм<sup>3</sup>, гидрокарбонатным кальциевым составом и с повышенными содержаниями Cl<sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup> и Na<sup>+</sup>. Установленные концентрации урана (<sup>238</sup>U) варьируют в диапазоне от 2.64 · 10<sup>-5</sup> до 2.25 · 10<sup>-3</sup> мг/дм<sup>3</sup>, тория (<sup>232</sup>Th) – от 2.04 · 10<sup>-7</sup> до 2.50 · 10<sup>-5</sup> мг/дм<sup>3</sup>. Природа радиоактивности изученных объектов связана с <sup>238</sup>U, поскольку воды характеризуются окислительными параметрами геохимической среды с величиной рН 7.1–8.9, Eh 67.2–209.3 мВ и содержанием растворенного кислорода 3.19–12.25 мг/дм<sup>3</sup>. Отношение <sup>232</sup>Th/<sup>238</sup>U составляет (1.09 · 10<sup>-3</sup>)–0.71. Наиболее обогащены <sup>238</sup>U воды зоны региональной трещиноватости преимущественно натриевых алюмосиликатов, подверженные процессам континентального засоления в условиях антропогенного влияния, а <sup>232</sup>Th – воды зоны региональной трещиноватости преимущественно натриевых алюмосиликатов (длительного взаимодействия в системе вода – порода), подверженные процессам континентального засоления. <sup>238</sup>U мигрирует в виде анионных комплексов UO<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub><sup>4-</sup> и UO<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub><sup>2-</sup>, в меньшей степени (<1 % от общего содержания) в виде Ca<sub>2</sub>UO<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>(вод) и CaUO<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub><sup>2-</sup>. Результаты расчетов по <sup>232</sup>Th показали его нахождение только в виде комплекса Th(OH)<sub>3</sub>CO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

**Ключевые слова:** природные воды, уран, торий, формы миграции, Крым

## ВВЕДЕНИЕ

Содержание радионуклидов в гидросфере Земли варьирует в широких пределах. Согласно п. 1 ст. 43 Водного кодекса Российской Федерации для целей питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения должны использоваться защищенные от загрязнения и засорения поверхностные водные объекты и подземные водные объекты, пригодность которых для указанных целей определяется на основании санитарно-эпидемиологических заключений. В соответствии с действующими нормативными документами СанПиН 2.1.4.1074–01 с изменениями на 02.04.2018, ГОСТ Р 51232–98, ГН 2.1.5.1315–03 с дополнениями [1–3] предельно допустимая концентрация (ПДК) в питьевых водах по урану ( $^{238}\text{U}$ ) составляет 0.015 мг/дм<sup>3</sup>, а по торью ( $^{232}\text{Th}$ ) не регламентирована. Научный комитет ООН по воздействию атомной радиации (UNSCEAR) оценил, что естественные источники вносят более 98 % дозы облучения населения. Естественная радиоактивность природных вод вызывает в мире большой интерес к радиологическому качеству питьевой воды. Крымский полуостров обладает огромным туристско-рекреационным потенциалом. Одним из важнейших ресурсов для его успешного развития являются природные воды, используемые в питьевых целях, санаторно-курортном лечении и оздоровлении, в сельском хозяйстве.

Гидрогеологические исследования Крымского полуострова ведутся более века и связаны с именами С. В. Альбова, Н. А. Белокопытовой, И. Г. Глухова, В. Н. Дублянского, Н. М. Заезжева, Н. Н. Капинос, В. А. Куришко, Е. В. Львова, А. В. Лущика, А. С. Моисеева, В. И. Морозова, Н. С. Огняника, Е. А. Ришес, В. И. Самулева, А. Б. Ситникова, А. А. Сухороброва, В. Г. Ткачук, О. Е. Фесюнова, М. В. Чуринова, В. М. Шестопалова, М. А. Шинкаревского, Ю. И. Шутова, Е. А. Яковлева и др. Наиболее крупное обобщение было выполнено в [4, 5]. Из последних исследований следует отметить работы И. Б. Абрамова, Б. М. Данилишина, С. П. Иванюты, А. В. Лущика, Г. Г. Лютого, Н. С. Огняника, С. А. Рубана, В. М. Шестопалова, М. А. Шинкаревского, Е. А. Яковлева, Д. А. Новикова и др. [6–11]. Байдарская долина расположена в живописной области на юго-западе Крымского полуострова в пределах Балаклавского района Севастопольской городской агломерации. Долина с южной и восточной сторон примыкает к главной гряде Крымских гор (Форос, Ат-Баш, Ай-Петри и др.) (рис. 1). С гидрогеохимической точки зрения

природные воды рассматриваемого региона слабо изучены [12–15]. В этой связи целью настоящей работы является обнародование на основе результатов экспедиционных и аналитических исследований первых данных по распределению и формам миграции урана и тория в разных геохимических типах природных вод Байдарской долины (Крымский полуостров).

## ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В 2018–2019 гг. нами впервые проведено детальное изучение геохимии природных вод Байдарской долины. Было отобрано и проанализировано 43 водных пробы. Пробы для анализа катионов и анионов отфильтровывались через целлюлозный фильтр (0.45 мкм) на месте отбора для удаления взвеси с помощью системы вакуумной фильтрации и собирались в полиэтиленовые бутылки. Для достоверного определения устойчивых компонентов в растворе на месте отбора пробы консервировались (для анализа катионов проба подкислялась азотной кислотой, для анионов – нет), после чего доставлялись в лаборатории для последующего анализа. Нестабильные параметры (рН, Eh, температура, содержание растворенного кислорода ( $\text{O}_2$  (раств)),  $\text{HCO}_3^-$ ) определялись на точке отбора проб воды с помощью полевой гидрогеохимической лаборатории и полевого оборудования (рН-метр HI 9125 (Hanna, Германия), кислородомер АКПМ-1-02Л (АО “Эксис”, Россия), также выполнялось полевое определение общей минерализации вод (кондуктометр S3-Field kit Seven2Go, Mettler Toledo, Швейцария). Радиационная обстановка на месте отбора проб оценивалась с помощью дозиметра гамма-излучения ДКГ-07Д “Дрозд” (Россия).

Лабораторное изучение ионно-солевого и микрокомпонентного состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) проводилось в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета (Томск) и в лабораториях центра коллективного пользования Института неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН (Новосибирск). Расчеты миграционных форм урана и тория в природных водах проводились с использованием программных комплексов WATEQ4f и Visual Minteq 3.0.

Общий химический состав вод и распределение в них U и Th отражены в табл. 1.

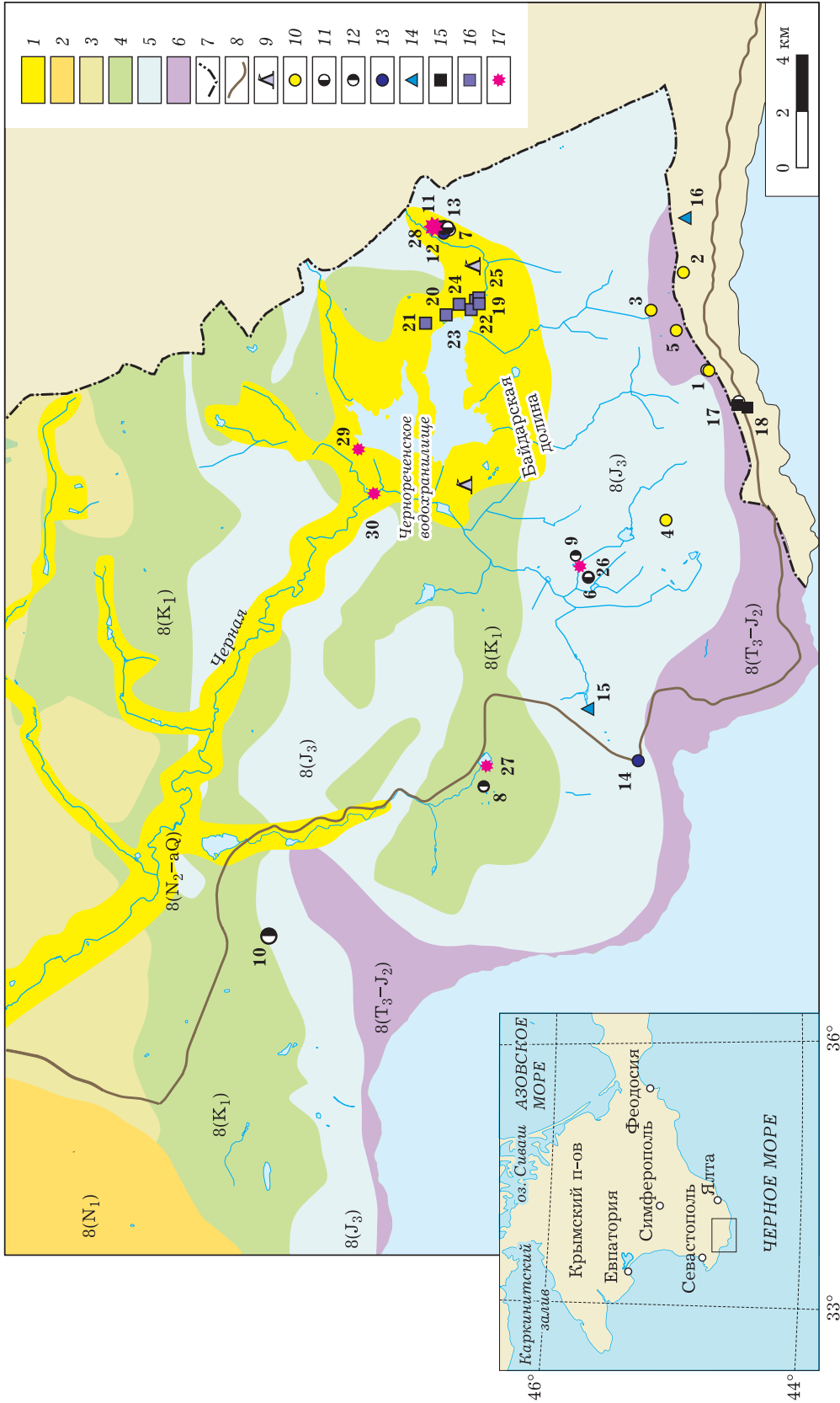


Рис. 1. Местоположение изученных водопунктов (1–30) в пределах Байдарской долины и ее горного обрамления. Здесь и на рис. 2–4: Водоносные комплексы: 1 – плоченовых и четвертичных отложений 8(N<sub>2</sub>-aQ); 2 – миоценовых отложений 8(N<sub>1</sub>); 3 – верхнемеловых отложений 8(K<sub>2</sub>); 4 – нижнемеловых отложений 8(K<sub>1</sub>); 5 – верхнеюрских отложений 8(J<sub>3</sub>); 6 – верхнепериасово-среднеюрских отложений 8(T<sub>3</sub>-J<sub>2</sub>); 7 – граница Севастопольской городской агломерации; 8 – автодорога Ялта – Севастополь (Н19); 9 – проявления марганцевых руд; 10 – (I группа): 1 – колодец Кильсе-Буруном; 2 – колодец Чертова лестница; 4 – источник Деспит; 5 – колодец Кую-Алан; 11 – (II группа): 6 – колодец Фуска-Чокрак; 7 – южный колодец, с. Колхозное; 12 – (III группа): 8 – источник Фонтан Варналы; 9 – источник Кара-Агач; 10 – источник Св. Пантелеймона; 13 – (IV группа): 11 – северный колодец, с. Колхозное; 12 – колодец центральный 1, с. Колхозное; 13 – колодец центральный 2, с. Колхозное; 14 – колодец центральной смотровой площадки; 14 – (V группа): 15 – источник Странный; 16 – колодец Санаторное верхний; 18 – колодец Санаторное нижний; 17 – (VI группа): 17 – колодец Санаторное основной; 17 – оз. Конюшня в с. Орлиное; 27 – оз. Узужинское, с. Колхозное; 29 – Чернореченское водохранилище; 30 – р. Черная.

ТАБЛИЦА 1

Геохимические особенности и распределение урана и тория в природных водах Байдарской долины

№ на рис. 1	Координаты		Абс. отметка, м	Год	pH	Eh	O <sub>2</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	Содержание элементов, мг/дм <sup>3</sup>							Химический тип <sup>a</sup>					
	Широта N	Долгота E						Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>		NO <sub>3</sub>	Si	U	Th	
<i>Воды зоны региональной трещиноватости карбонатно-терригенных пород, подверженные процессам континентального засоления (I группа)</i>																				
1	44°24'40"	33°49'60"	+358	2018	8.1	-	-	50.7	3.4	7.3	10.50	177	8.8	10.9	1.7	3.16	6.40 · 10 <sup>-5</sup>	8.85 · 10 <sup>-6</sup>	269	HCO <sub>3</sub> · Ca
1	44°24'40"	33°49'60"	+358	2019	7.5	147	3.2	90.0	5.8	12.4	1.70	285	15.0	19.8	6.4	3.75	2.64 · 10 <sup>-5</sup>	1.88 · 10 <sup>-5</sup>	436	HCO <sub>3</sub> · Ca
2	44°25'10"	33°51'50"	+363	2018	7.9	-	-	100.1	4.0	12.3	0.45	311	25.2	14.6	2.1	3.11	5.38 · 10 <sup>-4</sup>	4.00 · 10 <sup>-6</sup>	468	HCO <sub>3</sub> · Ca
2	44°25'10"	33°51'50"	+363	2019	7.9	67	-	98.0	9.8	16.2	0.38	317	25.9	19.3	0.3	3.69	3.25 · 10 <sup>-4</sup>	-	487	HCO <sub>3</sub> · Ca-Mg-Na
3	44°25'30"	33°51'05"	+611	2018	7.3	-	-	137.0	14.8	24.3	0.94	471	26.0	30.8	3.1	5.94	9.89 · 10 <sup>-4</sup>	6.50 · 10 <sup>-6</sup>	705	HCO <sub>3</sub> · Ca-Mg-Na
3	44°25'30"	33°51'05"	+611	2019	7.3	145	8.9	140.0	18.3	21.7	0.86	460	25.6	48.7	0.6	5.97	5.82 · 10 <sup>-4</sup>	9.83 · 10 <sup>-6</sup>	716	HCO <sub>3</sub> · Cl · Ca-Mg
4	44°25'20"	33°47'05"	+522	2018	7.4	-	-	133.0	18.2	14.4	0.71	470	27.8	19.0	3.8	4.24	4.73 · 10 <sup>-4</sup>	1.60 · 10 <sup>-6</sup>	683	HCO <sub>3</sub> · Ca-Mg
4	44°25'20"	33°47'05"	+522	2019	7.4	136	-	107.0	23.0	16.3	0.67	401	27.9	23.2	5.9	5.58	3.75 · 10 <sup>-4</sup>	-	605	HCO <sub>3</sub> · Ca-Mg
5	44°25'15"	33°50'40"	+577	2018 <sup>b</sup>	7.9	-	-	115.0	6.5	10.9	0.49	334	31.8	22.4	2.1	3.63	3.63 · 10 <sup>-4</sup>	2.30 · 10 <sup>-6</sup>	521	HCO <sub>3</sub> · Ca
<b>Среднее значение:</b>					<b>7.6</b>	<b>124</b>	<b>6.0</b>	<b>107.9</b>	<b>11.5</b>	<b>15.1</b>	<b>1.86</b>	<b>358</b>	<b>23.8</b>	<b>23.2</b>	<b>2.9</b>	<b>4.34</b>	<b>4.15 · 10<sup>-4</sup></b>	<b>7.42 · 10<sup>-6</sup></b>	<b>543</b>	-
<i>Воды зоны региональной трещиноватости выщелачивания алюмосиликатов и окисления сульфидов (II группа)</i>																				
6	44°26'30"	33°45'60"	+263	2018	7.8	-	-	88.0	8.8	10.2	0.53	273	33.6	14.8	2.2	2.85	3.68 · 10 <sup>-4</sup>	2.55 · 10 <sup>-6</sup>	429	HCO <sub>3</sub> · SO <sub>4</sub> · Ca-Mg
6	44°26'30"	33°45'60"	+263	2019	7.4	172	5.6	98.0	15.3	14.2	0.33	347	28.1	17.5	2.0	3.87	2.05 · 10 <sup>-4</sup>	1.13 · 10 <sup>-5</sup>	520	HCO <sub>3</sub> · Ca-Mg
7	44°28'20"	33°52'50"	+362	2018	7.4	-	-	102.5	6.7	13.1	1.24	354	13.2	6.5	2.4	4.89	5.10 · 10 <sup>-4</sup>	6.03 · 10 <sup>-6</sup>	497	HCO <sub>3</sub> · Ca
7	44°28'20"	33°52'50"	+362	2019	7.4	173	5.6	114.0	8.5	19.5	0.94	411	14.8	7.9	2.2	5.60	5.22 · 10 <sup>-4</sup>	1.46 · 10 <sup>-5</sup>	577	HCO <sub>3</sub> · Ca-Na
<b>Среднее значение:</b>					<b>7.5</b>	<b>172</b>	<b>5.6</b>	<b>100.6</b>	<b>9.8</b>	<b>14.3</b>	<b>0.76</b>	<b>346</b>	<b>22.4</b>	<b>11.7</b>	<b>2.2</b>	<b>4.30</b>	<b>4.01 · 10<sup>-4</sup></b>	<b>8.64 · 10<sup>-6</sup></b>	<b>506</b>	-
<i>Воды зоны региональной трещиноватости преимущественно натриевых алюмосиликатов (длительного взаимодействия в системе вода – порода), подверженные процессам континентального засоления (III группа)</i>																				
8	44°27'55"	33°41'50"	+137	2018	7.1	209	3.8	137.0	19.0	36.8	9.70	420	59.0	52.7	1.5	6.15	1.63 · 10 <sup>-4</sup>	2.50 · 10 <sup>-5</sup>	774	HCO <sub>3</sub> · Cl · Ca-Na-Mg
8	44°27'55"	33°41'50"	+137	2019	7.1	-	-	123.8	11.7	30.7	4.73	427	34.6	31.4	40.1	5.80	7.20 · 10 <sup>-4</sup>	8.38 · 10 <sup>-6</sup>	664	HCO <sub>3</sub> · Cl · SO <sub>4</sub> · Ca-Na-Mg
9	44°26'40"	33°46'25"	+138	2018 <sup>b</sup>	7.7	-	-	105.3	9.8	27.4	16.26	366	39.3	29.5	4.2	4.54	6.90 · 10 <sup>-4</sup>	2.32 · 10 <sup>-6</sup>	594	HCO <sub>3</sub> · Cl · SO <sub>4</sub> · Ca-Na-Mg
10	44°30'60"	33°38'60"	+177	2019	7.2	185	9.8	98.0	24.0	23.8	0.32	406	27.0	23.5	2.2	6.12	8.98 · 10 <sup>-4</sup>	-	605	HCO <sub>3</sub> · Ca-Mg-Na
<b>Среднее значение:</b>					<b>7.3</b>	<b>197</b>	<b>6.8</b>	<b>116.0</b>	<b>16.1</b>	<b>29.7</b>	<b>7.75</b>	<b>405</b>	<b>40.0</b>	<b>34.3</b>	<b>12.0</b>	<b>5.65</b>	<b>1.18 · 10<sup>-4</sup></b>	<b>1.19 · 10<sup>-5</sup></b>	<b>659</b>	-
<i>Воды зоны региональной трещиноватости преимущественно натриевых алюмосиликатов, подверженные процессам континентального засоления в условиях антропогенного влияния (IV группа)</i>																				
11	44°28'30"	33°52'55"	+364	2018 <sup>b</sup>	8.5	-	-	101.0	7.8	44.7	3.87	360	45.1	29.9	3.6	4.11	1.86 · 10 <sup>-3</sup>	2.23 · 10 <sup>-6</sup>	592	HCO <sub>3</sub> · SO <sub>4</sub> · Cl · Ca-Na
12	44°28'25"	33°52'50"	+372	2019	7.2	154	3.8	157.0	33.0	117.0	49.80	537	111.0	127.0	137.0	6.28	2.25 · 10 <sup>-3</sup>	1.35 · 10 <sup>-5</sup>	1269	HCO <sub>3</sub> · Cl · SO <sub>4</sub> · Ca-Na-Mg
13	44°28'25"	33°52'55"	+371	2019	7.4	171	4.0	164.0	39.0	70.1	0.45	291	58.0	197.0	180.0	6.21	1.69 · 10 <sup>-3</sup>	1.56 · 10 <sup>-5</sup>	1000	Cl · HCO <sub>3</sub> · Ca-Mg-Na

14	44°25'50"	33°42'30"	+302	2018 <sup>b</sup>	8.3	-	-	1038.8	12.9	82.9	2.47	226	183.0	85.7	1.5	3.26	7.30 · 10 <sup>-4</sup>	4.80 · 10 <sup>-6</sup>	697	SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> -Cl · Ca-Na-Mg
<b>Среднее значение:</b>																				
<i>Трещинно-жильные воды выщелачивания натриевых алюмосиликатов и окисления сульфидов (V группа)</i>																				
15	44°26'30"	33°43'20"	+304	2018 <sup>b</sup>	7.9	-	-	141.0	14.6	21.2	1.09	301	170.0	25.9	2.0	4.29	8.50 · 10 <sup>-4</sup>	-	675	HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> · Ca-Mg-Na
16	44°25'05"	33°52'55"	+400	2018 <sup>b</sup>	8.6	-	-	44.0	6.8	13.5	1.03	128	53.1	6.6	0.7	1.50	1.51 · 10 <sup>-4</sup>	-	253	HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> · Ca-Mg-Na
<b>Среднее значение:</b>																				
<i>Трещинно-жильные воды выщелачивания натриевых алюмосиликатов (длительного взаимодействия в системе вода - порода) (VI группа)</i>																				
17	44°24'15"	33°49'20"	+192	2018	7.2	-	-	117.0	17.6	23.0	1.59	466	5.6	20.4	3.3	4.74	4.60 · 10 <sup>-5</sup>	4.31 · 10 <sup>-6</sup>	651	HCO <sub>3</sub> -Cl · Ca-Mg-Na
17	44°24'15"	33°49'20"	+192	2019	7.2	110	5.9	98.0	19.5	22.4	1.40	403	6.9	23.0	0.5	6.56	2.30 · 10 <sup>-5</sup>	-	575	HCO <sub>3</sub> -Cl · Ca-Mg-Na
18	44°24'10"	33°49'20"	+143	2018 <sup>b</sup>	7.6	-	-	143.0	18.7	25.7	1.32	493	16.0	48.6	2.9	5.94	2.50 · 10 <sup>-4</sup>	3.86 · 10 <sup>-6</sup>	746	HCO <sub>3</sub> -Cl · Ca-Mg-Na
<b>Среднее значение:</b>																				
<i>Трещинно-карстовые воды (VII группа)</i>																				
19	44°27'60"	33°51'25"	-77	2018	8.0	-	-	107.0	5.0	4.2	0.5	348	7.0	4.7	2.6	2.17	1.56 · 10 <sup>-4</sup>	1.30 · 10 <sup>-6</sup>	476	HCO <sub>3</sub> · Ca
20	44°28'30"	33°51'00"	-539	2018	7.9	-	-	93.0	5.6	4.5	0.50	303	9.7	5.2	2.6	2.40	3.12 · 10 <sup>-4</sup>	3.60 · 10 <sup>-6</sup>	422	HCO <sub>3</sub> · Ca
21	44°28'40"	33°50'60"	-539	2018	8.2	-	-	139.0	5.3	4.7	0.60	441	10.2	5.4	2.8	2.21	3.01 · 10 <sup>-4</sup>	5.70 · 10 <sup>-6</sup>	606	HCO <sub>3</sub> · Ca
22	44°27'55"	33°51'20"	-997	2018	8.2	-	-	83.3	2.8	2.2	0.38	262	5.6	3.0	2.5	1.42	1.30 · 10 <sup>-4</sup>	1.30 · 10 <sup>-6</sup>	359	HCO <sub>3</sub> · Ca
23	44°27'60"	33°51'05"	-352	2018	7.9	-	-	9.0	7.8	6.2	0.64	311	9.4	5.2	2.5	3.03	3.35 · 10 <sup>-4</sup>	2.99 · 10 <sup>-6</sup>	430	HCO <sub>3</sub> · Ca-Mg
23	44°27'60"	33°51'05"	-352	2019	7.4	118	8.3	86.0	8.5	5.1	0.34	296	7.7	7.6	3.1	2.34	2.52 · 10 <sup>-4</sup>	5.01 · 10 <sup>-6</sup>	414	HCO <sub>3</sub> · Ca-Mg
24	44°27'60"	33°51'10"	+54	2018	7.4	-	-	90.9	4.5	3.8	0.47	293	9.7	4.7	1.7	2.02	2.81 · 10 <sup>-4</sup>	7.90 · 10 <sup>-7</sup>	407	HCO <sub>3</sub> · Ca
24	44°27'60"	33°51'10"	+54	2019	7.4	180	8.3	88.0	7.3	5.1	0.35	299	8.6	5.8	2.3	2.74	1.89 · 10 <sup>-4</sup>	-	417	HCO <sub>3</sub> · Ca-Mg
25	44°27'55"	33°51'30"	+412	2019	7.5	155	7.2	90.0	5.4	3.1	0.26	292	6.4	5.8	2.1	1.99	1.22 · 10 <sup>-4</sup>	9.61 · 10 <sup>-6</sup>	403	HCO <sub>3</sub> · Ca
25	44°27'55"	33°51'30"	+412	2018	7.5	-	-	116.0	4.3	5.9	0.49	368	8.0	3.2	2.4	1.99	2.64 · 10 <sup>-4</sup>	3.30 · 10 <sup>-6</sup>	503	HCO <sub>3</sub> · Ca
<b>Среднее значение:</b>																				
<i>Поверхностные воды, подверженные влиянию процессов континентального засоления (VIII группа)</i>																				
26	44°26'30"	33°46'10"	+267	2019	8.0	160	9.5	66.0	12.0	3.6	2.40	182	22.0	36.0	2.1	4.13	6.10 · 10 <sup>-4</sup>	3.78 · 10 <sup>-6</sup>	326	HCO <sub>3</sub> -Cl-SO <sub>4</sub> · Ca-Mg
27	44°27'50"	33°42'20"	+261	2019	8.9	177	12.3	33.5	6.1	20.0	1.80	120	13.7	29.4	0.9	0.31	1.87 · 10 <sup>-4</sup>	2.04 · 10 <sup>-7</sup>	225	HCO <sub>3</sub> -Cl · Ca-Na-Mg
28	44°28'35"	33°52'50"	+358	2019	8.3	159	8.9	65.0	9.2	14.2	2.10	250	10.7	13.0	0.0	1.03	4.84 · 10 <sup>-4</sup>	7.68 · 10 <sup>-6</sup>	364	HCO <sub>3</sub> · Ca-Mg-Na
29	44°29'40"	33°48'30"	+252	2018	8.3	-	-	42.9	4.5	3.5	0.84	135	15.0	5.7	7.4	0.24	1.78 · 10 <sup>-4</sup>	3.05 · 10 <sup>-6</sup>	207	HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> · Ca-Mg
29	44°29'40"	33°48'30"	+252	2019	8.3	116	8.6	44.0	4.3	4.4	0.54	151	6.6	5.9	0.0	0.50	-	-	217	HCO <sub>3</sub> · Ca-Mg
30	44°29'30"	33°47'40"	+222	2018	8.0	-	-	58.3	3.2	4.0	0.82	185	9.3	5.1	1.4	0.97	1.90 · 10 <sup>-4</sup>	-	266	HCO <sub>3</sub> · Ca
30	44°29'30"	33°47'40"	+222	2019	8.2	159	8.9	51.0	7.9	4.5	0.54	186	8.6	6.2	0.5	1.08	1.81 · 10 <sup>-4</sup>	8.88 · 10 <sup>-6</sup>	265	HCO <sub>3</sub> · Ca-Mg
<b>Среднее значение:</b>																				
<b>Гидрогеохимический фон:</b>																				
					<b>8.3</b>	<b>154</b>	<b>9.6</b>	<b>51.5</b>	<b>6.7</b>	<b>7.8</b>	<b>1.29</b>	<b>173</b>	<b>12.3</b>	<b>14.5</b>	<b>1.8</b>	<b>1.18</b>	<b>3.05 · 10<sup>-4</sup></b>	<b>4.72 · 10<sup>-6</sup></b>	<b>267</b>	
					<b>7.4</b>	<b>159</b>	<b>8.3</b>	<b>98.0</b>	<b>8.5</b>	<b>14.2</b>	<b>0.82</b>	<b>317</b>	<b>16.0</b>	<b>19.0</b>	<b>2.2</b>	<b>3.54</b>	<b>4.66 · 10<sup>-4</sup></b>	<b>6.60 · 10<sup>-6</sup></b>	<b>497</b>	

Примечание. Прочерк – отсутствие данных; М – минерализация, мг/дм<sup>3</sup>.

<sup>a</sup> Название химического типа дано по классификации С. А. Щукарева (в формулу добавлены макрокомпоненты с долей > 10 %-экв).

<sup>b</sup> Источник в 2019 г. сухой.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

## Геохимические типы природных вод и распределение в них урана и тория

Основные ресурсы подземных вод Байдарской долины приурочены к верхнеюрскому водоносному комплексу, играющему особую роль, поскольку с ним связаны основные области питания для водонапорных систем: Равнинно-Крымского, Азово-Кубанского артезианских бассейнов и гидрогеологической складчатой области мегаантиклинория Горного Крыма. Его мощность достигает 2000 м. Детальная характеристика его гидрогеологических особенностей приведена в работах [16–19].

В Байдарской долине развиты пресные и ультрапресные воды преимущественно гидро-

карбонатного кальциевого состава (по С. А. Щукареву) с величиной общей минерализации от 207.4 до 1268.8 мг/дм<sup>3</sup>. Отмечается закономерное поведение основных химических элементов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ ) с увеличением общей минерализации природных вод и их химическим типом. Разделение имеющихся данных на однородные совокупности по геохимическим коэффициентам ( $\text{Ca}/\text{Na}$ ,  $\text{Ca}/\text{Mg}$ ,  $\text{Ca}/\text{Si}$ ,  $\text{Mg}/\text{Si}$ ,  $\text{Na}/\text{Si}$ ,  $\text{Si}/\text{Na}$ ,  $r\text{Na}/r\text{Cl}$  и  $\text{SO}_4/\text{Cl}$ ) позволило проследить источники поступления элементов при формировании вод в карбонатных, карбонатно-терригенных, алюмосиликатных, в том числе с вкраплениями сульфидов, породах (рис. 2).

Дадим краткую характеристику выделенных типов вод по геохимическим разновидностям (группы I–VIII) и содержанию в них  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ .

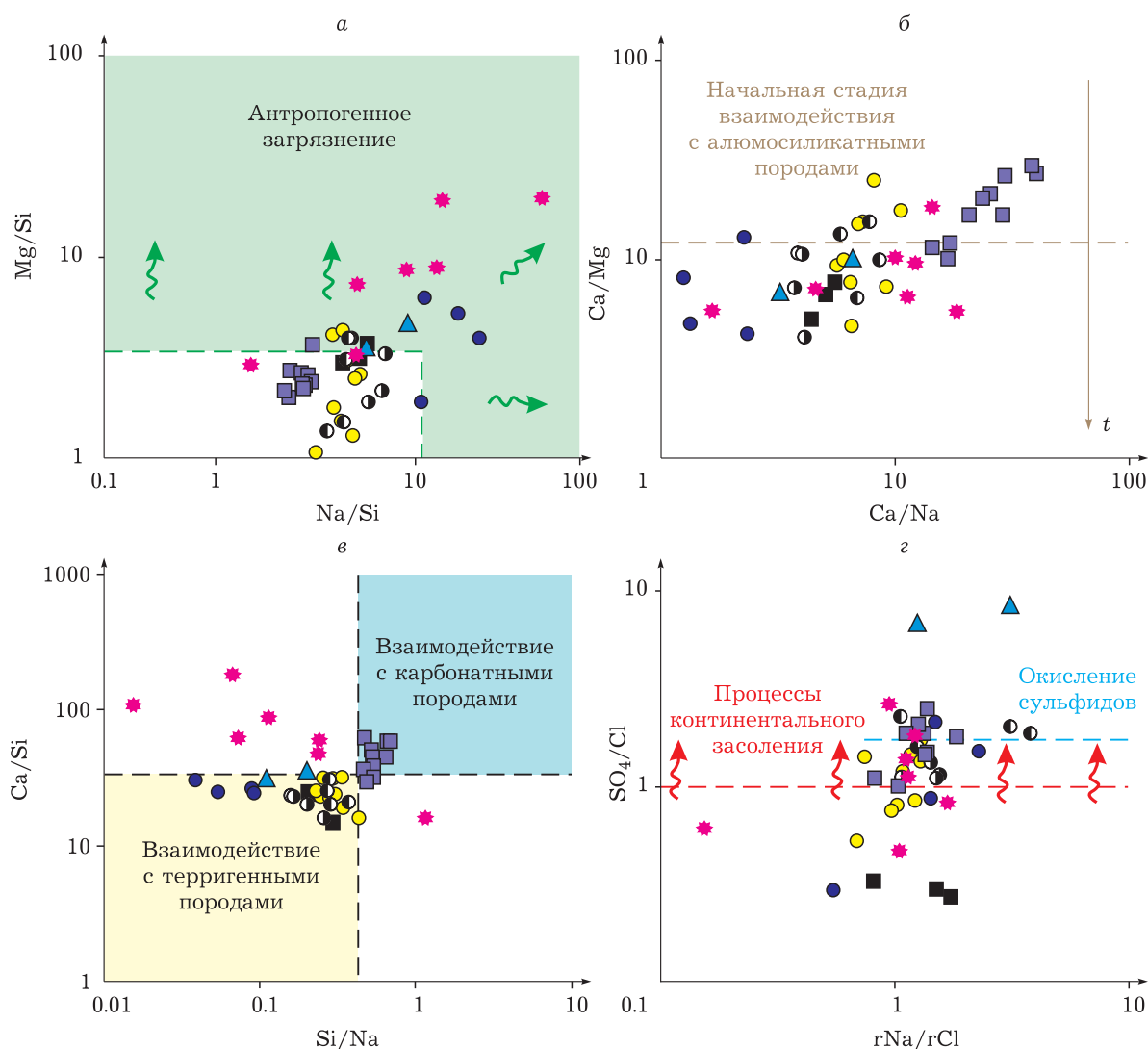


Рис. 2. Геохимическая типизация природных вод Байдарской долины по коэффициентам  $\text{Mg}/\text{Si}$  –  $\text{Na}/\text{Si}$  (а),  $\text{Ca}/\text{Mg}$  –  $\text{Ca}/\text{Na}$  (б),  $\text{Ca}/\text{Si}$  –  $\text{Si}/\text{Na}$  (в) и  $\text{SO}_4/\text{Cl}$  –  $r\text{Na}/r\text{Cl}$  (г). Усл. обозн. см. рис. 1.

**Воды зоны региональной трещиноватости карбонатно-терригенных пород, подверженные влиянию процессов континентального засоления (группа I)** – слабощелочные со средними значениями рН 7.8; с окислительной геохимической обстановкой с величиной  $E_h = 67.2-145.6$  мВ и содержанием  $O_2(\text{раств})$  3.19–8.85 мг/дм<sup>3</sup>, собственно пресные с минерализацией 543 мг/дм<sup>3</sup> (по классификации С. Л. Шварцева [20]) и средним содержанием кремния 4.3 мг/дм<sup>3</sup>. Воды гидрокарбонатные с долей сульфатов и хлоридов до 10 %-экв преимущественно кальциевые с долей магния до 24 %-экв в роднике Деспита, и до 10 %-экв натрия в родниках Чертова лестница и Q 044. По соотношению распространенности магния и натрия при близких значениях Mg/Si и Na/Si прослеживается взаимодействие вод с карбонатно-терригенными образованиями – при значениях Ca/Si = 25.3, Ca/Na = 7.4 значения Ca/Mg = 12.5 свидетельствуют о начальных стадиях взаимодействия в системе вода – порода при средних значениях rNa/rCl = 1.05. Концентрации <sup>238</sup>U составляют  $(2.64 \cdot 10^{-5})-(9.89 \cdot 10^{-4})$  мг/дм<sup>3</sup>, <sup>232</sup>Th –  $(1.60 \cdot 10^{-6})-(1.88 \cdot 10^{-5})$  мг/дм<sup>3</sup>, отношение Th/U варьирует в интервале  $(3.38 \cdot 10^{-3})-0.71$ .

При взаимодействии вод зоны региональной трещиноватости с сульфидной минерализацией (группа II) в условиях континентального засоления воды слабощелочные с рН 7.6, также сохраняется окислительная среда с  $E_h = 172.1-173.0$  мВ и содержанием  $O_2(\text{раств})$ , равным 5.61 мг/дм<sup>3</sup>, собственно пресные со средней минерализацией 506 мг/дм<sup>3</sup> и содержанием кремния 4.3 мг/дм<sup>3</sup>. Эти воды практически не отличаются от вышерассмотренных, и их следует включить в воды зоны региональной трещиноватости карбонатно-терригенных образований. Для них характерно только повышение средних значений  $SO_4/Cl = 1.9$  по сравнению с типичными водами зон региональной трещиноватости в условиях континентального засоления, где  $SO_4/Cl = 1.1$ . Содержания <sup>238</sup>U составляют  $(2.05 \cdot 10^{-4})-(5.22 \cdot 10^{-4})$  мг/дм<sup>3</sup>, <sup>232</sup>Th –  $(2.55 \cdot 10^{-6})-(1.46 \cdot 10^{-5})$  мг/дм<sup>3</sup>, отношение Th/U варьирует в интервале  $(6.93 \cdot 10^{-3})-(5.52 \cdot 10^{-2})$ .

**Воды зоны региональной трещиноватости преимущественно натриевых алюмосиликатов (длительного взаимодействия в системе вода – порода), подверженные процессам континентального засоления (группа III).** По составу воды слабощелочные с рН 7.7,  $E_h = 185.4-209.3$  мВ и содержанием  $O_2(\text{раств})$ , равным 3.79–9.80 мг/дм<sup>3</sup>, собственно пресные со средней минерализацией 659 мг/дм<sup>3</sup> и с содержанием кремния

5.7 мг/дм<sup>3</sup>; гидрокарбонатные с долей хлоридов до 15 %-экв (фонтан Варналы в с. Гончарное) и долей сульфат-иона до 10.7–12.0 %-экв (источник Кара-Агач и фонтан Варналы). При увеличении влияния алюмосиликатных образований за счет взаимодействия с водами значения Na/Si превышают значения Mg/Si, снижаются Ca/Mg до 8.1, Ca/Na до 3.9, несколько уменьшаются Ca/Si до 20.7 и повышаются средние rNa/rCl до 1.4. Содержания <sup>238</sup>U составляют  $(1.63 \cdot 10^{-4})-(8.98 \cdot 10^{-4})$  мг/дм<sup>3</sup>, <sup>232</sup>Th –  $(2.32 \cdot 10^{-6})-(2.50 \cdot 10^{-5})$  мг/дм<sup>3</sup>, отношение Th/U варьирует в интервале  $(3.36 \cdot 10^{-3})-0.15$ .

**Воды зоны региональной трещиноватости преимущественно натриевых алюмосиликатов, подверженные процессам континентального засоления в условиях антропогенного влияния (группа IV),** слабощелочные с рН 7.6,  $E_h = 154.5-171.8$  мВ и содержанием  $O_2(\text{раств})$  3.79–3.98 мг/дм<sup>3</sup>, собственно пресные с минерализацией 889 мг/дм<sup>3</sup> и содержанием кремния 5.0 мг/дм<sup>3</sup>. Антропогенное влияние на воды сели-тебных районов можно проследить на примере с. Колхозного, где они приобретают гидрокарбонатно-хлоридный кальциевый, сульфатно-гидрокарбонатно-хлоридный кальциево-натриевый состав с долей хлорид-иона до 20–30 %-экв и нитратов до 20 %-экв. В условиях антропогенного влияния в грунтовых водах повышаются значения Na/Si до 16.5 и Mg/Si до 4.3, значения Ca/Na, напротив, снижаются до 1.8, а Ca/Mg = 7.5 и rNa/rCl = 1.5 остаются без изменений. Концентрации <sup>238</sup>U составляют  $(7.30 \cdot 10^{-4})-(2.25 \cdot 10^{-3})$  мг/дм<sup>3</sup>, <sup>232</sup>Th –  $(2.23 \cdot 10^{-6})-(1.56 \cdot 10^{-5})$  мг/дм<sup>3</sup>, отношение Th/U варьирует в интервале от  $1.20 \cdot 10^{-3}$  до  $9.25 \cdot 10^{-3}$ .

**Трещинно-жилльные воды в алюмосиликатных образованиях (группы V и VI)** слабощелочные с рН 7.2–8.6 (среднее значение – 7.7), средней величиной  $E_h = 110.2$  мВ и содержанием  $O_2(\text{раств})$  5.90 мг/дм<sup>3</sup>, со средней минерализацией 580 мг/дм<sup>3</sup> и содержанием кремния 4.6 мг/дм<sup>3</sup>; гидрокарбонатные и гидрокарбонатно-сульфатные кальциевые с долей хлоридов до 14 %-экв при содержании хлорид-иона 48.6 мг/дм<sup>3</sup> в колодце Санаторный нижний. В источниках Мердвен Каясы и Странный отмечаются высокие доли сульфат-иона – до 32.6–38.5 %-экв соответственно. Трещинно-жилльные воды в алюмосиликатных образованиях по соотношению химических элементов проявляются высокими средними значениями  $SO_4/Cl = 7.3$  (при взаимодействии вод с сульфидами) и низкими значениями –  $SO_4/Cl = 0.3$  (в условиях длительного вза-

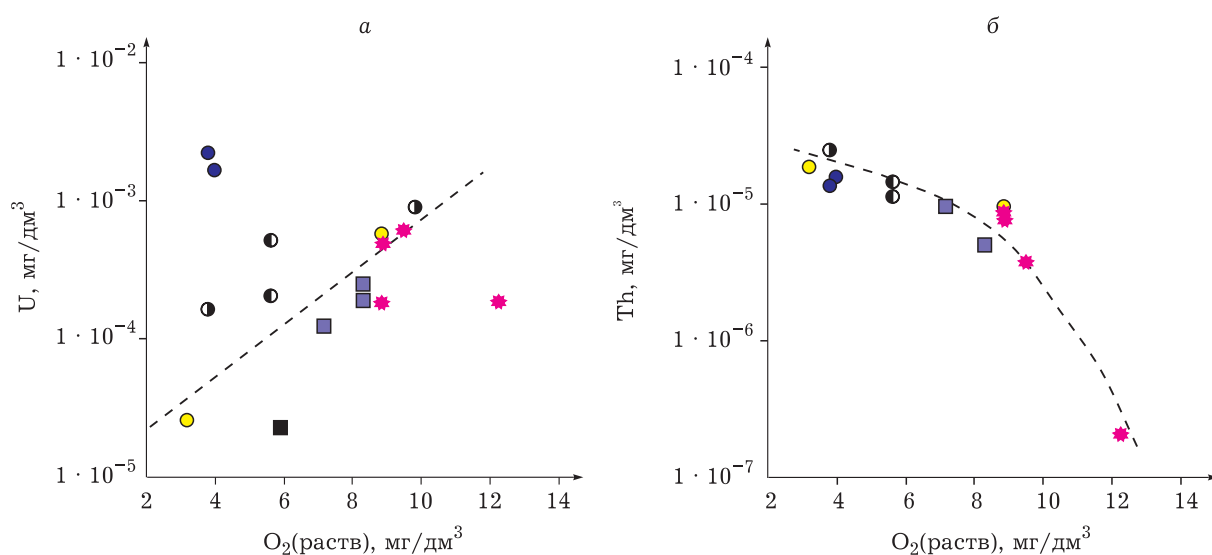


Рис. 3. Зависимость концентрации урана (а) и тория (б) от содержания растворенного кислорода в разных геохимических типах природных вод Байдарской долины. Усл. обозн. см. рис. 1.

имодействия вод с алюмосиликатами). Характеризуются высокими отношениями  $\text{Na/Si} = 5.3$ ,  $\text{Mg/Si} = 3.5$  и  $\text{Ca/Mg} = 7.1$ , низкими значениями  $\text{Ca/Na} = 4.9$  и  $\text{Ca/Si} = 25.1$ . Концентрации  $^{238}\text{U}$  составляют  $(2.30 \cdot 10^{-5}) - (8.50 \cdot 10^{-4})$  мг/дм<sup>3</sup>,  $^{232}\text{Th}$  –  $(3.86 \cdot 10^{-6}) - (4.31 \cdot 10^{-6})$  мг/дм<sup>3</sup>, отношение  $\text{Th/U}$  варьирует в интервале от  $1.55 \cdot 10^{-2}$  до  $9.38 \cdot 10^{-2}$ .

**Трещинно-карстовые воды (группа VII)** формируются при взаимодействии с карбонатными образованиями и характеризуются фоновыми значениями  $\text{SO}_4$ , которые в среднем составляют 8.2 мг/дм<sup>3</sup>, а  $\text{Cl} = 5.1$  мг/дм<sup>3</sup>. Слабощелочные с  $\text{pH} 7.7$ ;  $\text{Eh}$  варьирует от 118.7 до 180.5 мВ; содержание  $\text{O}_2(\text{раств})$  составляет 7.16–8.33 мг/дм<sup>3</sup>, пресные с минерализацией 444 мг/дм<sup>3</sup> и невысокими концентрациями кремния – 2.29 мг/дм<sup>3</sup>; гидрокарбонатные кальциевые. Характерны значения:  $\text{Na/Si} = 2.0$ ,  $\text{Mg/Si} = 2.5$ ,  $\text{rNa/rCl} = 1.0$ . Высокие средние значения отношения  $\text{Ca/Si} = 44.1$ ,  $\text{Ca/Mg} = 18.5$  и особенно по сравнению с другими разновидностями значения отношения  $\text{Ca/Na}$ , равные 23.3, являются отличительной чертой состава трещинно-карстовых вод. У Скульского источника  $\text{Ca/Na} = 34.7$ , а содержание кремния снижается до 2.0 мг/дм<sup>3</sup>. Содержание  $^{238}\text{U}$  варьирует в интервале  $(1.22 \cdot 10^{-4}) - (3.35 \cdot 10^{-3})$  мг/дм<sup>3</sup>,  $^{232}\text{Th}$  –  $(7.90 \cdot 10^{-7}) - (9.61 \cdot 10^{-6})$  мг/дм<sup>3</sup>, отношение  $\text{Th/U}$  составляет  $(2.81 \cdot 10^{-3}) - (7.87 \cdot 10^{-2})$ .

**Поверхностные воды (группа VIII)** подвержены влиянию процессов континентального засоления. Они слабощелочные с  $\text{pH} 8.3$ , с окислительными условиями геохимической обстановки со значениями  $\text{Eh}$ , варьирующими от 116.4 до

177.0 мВ, и содержанием  $\text{O}_2(\text{раств})$  8.63–12.25 мг/дм<sup>3</sup>. Воды гидрокарбонатного кальциевого состава р. Черной и Чернореченского водохранилища умеренно-пресные с минерализацией 267 мг/дм<sup>3</sup> и содержанием кремния 1.2 мг/дм<sup>3</sup>; гидрокарбонатно-хлоридного кальциевого с повышенной долей натрия до 20 %-экв в озере с. Гончарное и гидрокарбонатно-хлоридного кальциевого в оз. Конюшня с. Орлиное. Содержание  $^{238}\text{U}$  составляет  $(1.78 \cdot 10^{-4}) - (6.10 \cdot 10^{-4})$  мг/дм<sup>3</sup>,  $^{232}\text{Th}$  –  $(2.04 \cdot 10^{-7}) - (8.88 \cdot 10^{-6})$  мг/дм<sup>3</sup>, отношение  $\text{Th/U}$  варьирует в интервале  $(1.09 \cdot 10^{-3}) - (4.91 \cdot 10^{-2})$ .

Природа радиоактивности изученных объектов связана с  $^{238}\text{U}$  (рис. 3, а), поскольку воды характеризуются окислительными параметрами геохимической обстановки с величиной  $\text{pH} 7.1 - 8.9$ ,  $\text{Eh} = 67.2 - 209.3$  мВ и содержанием  $\text{O}_2(\text{раств})$  3.19–12.25 мг/дм<sup>3</sup>. Отношение  $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$  составляет  $(1.09 \cdot 10^{-3}) - 0.71$ . При этом установлена тенденция роста концентраций тория с уменьшением содержания растворенного кислорода в водах, поскольку он мигрирует в бескислородной среде (см. рис. 3, б).

#### Формы миграции урана и тория в природных водах

Из-за склонности  $\text{U(VI)}$  к комплексообразованию основными формами его миграции являются комплексные соединения уранила с карбонат-ионами. Полученные данные по формам миграции хорошо согласуются с положением полей на



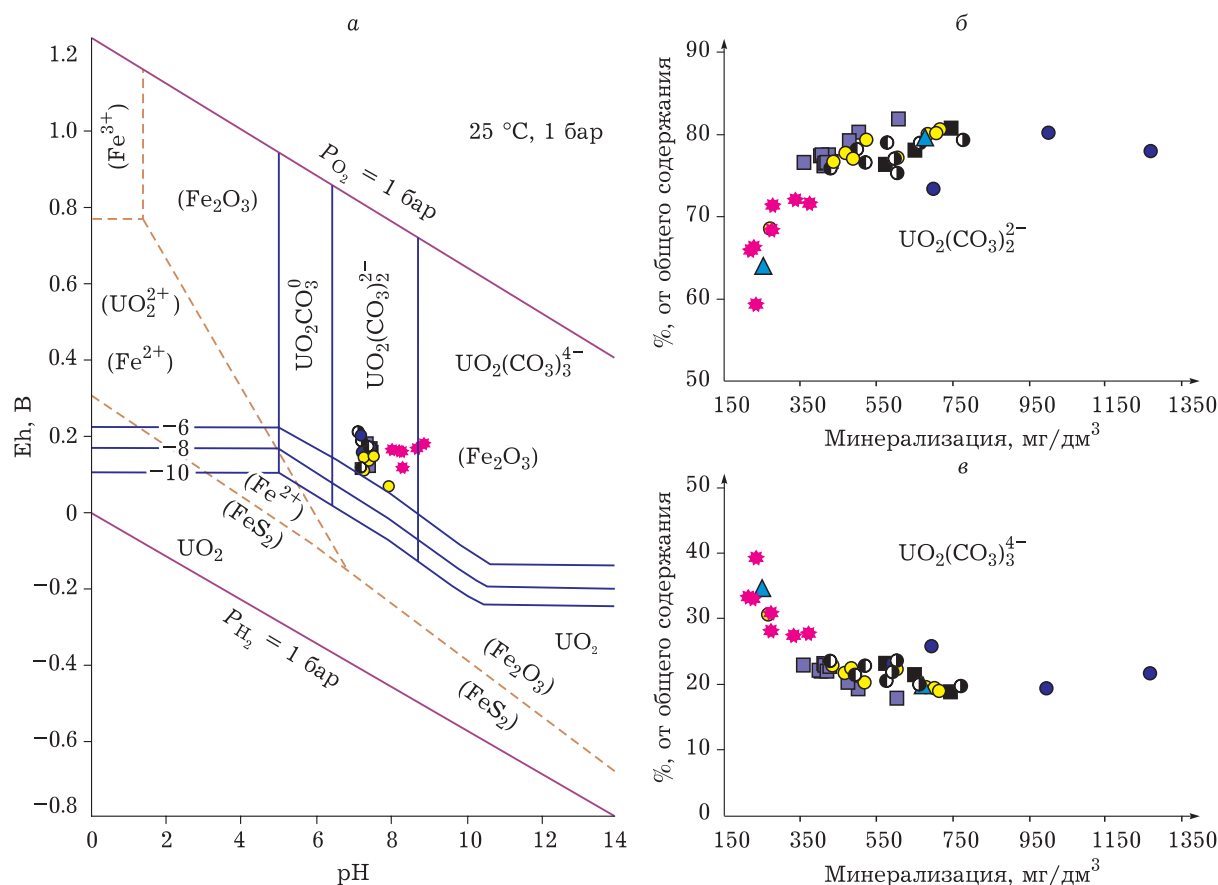


Рис. 4. Диаграмма Eh–рН для системы U–C–O–H с элементами системы Fe–S–O–H [21] (а) и расчетные формы миграции урана в природных водах Байдарской долины (б, в). Усл. обозн. см. рис. 1.

рис. 4, а [21] и результатами наших геохимических расчетов (см. рис. 4, б, в). Так, учитывая химический состав природных вод Байдарской долины (слабощелочные, pH 7.2–8.3, и открытые в отношении атмосферного углекислого газа, а также с карбонатным составом вод), можно с достаточной долей уверенности сказать, что уран будет мигрировать в водах преимущественно в виде анионных трикарбонат-уранильных  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$  и дикарбонат-уранильных  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$  комплексов. Кроме того, в количестве менее 1 % в водах присутствуют комплексы  $\text{Ca}_2\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^0$  (вод) и  $\text{CaUO}_2(\text{CO}_3)_3^{2-}$ . Умеренные концентрации кальция (или других щелочноземельных металлов, таких как магний, стронций, барий и радий) приводят к образованию кальциево-карбонатных комплексов U(VI) при стандартных условиях pH и средних уровнях щелочности (>1 ммоль/л как  $\text{CaCO}_3$ ) [22–24].

Установлено, что с ростом величины общей минерализации изученных вод возрастает доля дикарбонат-уранильных комплексов и уменьшается доля трикарбонат-уранильных (см. рис. 4, б, в). Для поверхностных вод (VIII груп-

па), а также единичных проб I и V групп долевое распределение форм  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$  составляет 59–71 %, тогда как для подземных вод – 63–82 %.

Экспериментальные и теоретические исследования форм, растворимости и сорбции тория в водах с низкой ионной силой описаны в работах [25–30]. D. Langmuir и J. S. Herman [26] создали термодинамическую базу данных для низкотемпературных природных вод, которая широко применяется. Однако она не содержит информации о важных комплексах карбоната тория, а стабильность фосфатных его комплексов также может быть переоценена [28]. Наши расчеты в среде программного комплекса Visul Minteq 3.0 показали, что весь торий находится в форме  $\text{Th}(\text{OH})_3\text{CO}_3^-$ .

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя вышесказанное, следует отметить, что концентрации радионуклидов в природных водах Байдарской долины изменяются в пределах двух математических порядков:

урана ( $^{238}\text{U}$ ) от  $2.64 \cdot 10^{-5}$  до  $2.25 \cdot 10^{-3}$  мг/дм<sup>3</sup> и тория ( $^{232}\text{Th}$ ) от  $2.04 \cdot 10^{-7}$  до  $2.50 \cdot 10^{-5}$  мг/дм<sup>3</sup>. Отношение  $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$  варьирует в интервале  $(1.09 \cdot 10^{-3})$ –0.71. Природа радиоактивности изученных объектов связана с ураном, а не торием, поскольку воды характеризуются окислительными параметрами геохимической обстановки. При этом отмечается закономерный тренд роста концентраций тория со снижением содержания в водах растворенного кислорода. Уран мигрирует в этих условиях преимущественно в виде анионных комплексов  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$  и  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ , в меньшей степени (<1 % от общего содержания) – в виде  $\text{Ca}_2\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3(\text{вод})$  и  $\text{CaUO}_2(\text{CO}_3)_3^{2-}$ . Рассчитанные формы миграции тория показали его нахождение только в виде комплекса  $\text{Th}(\text{OH})_3\text{CO}_3^-$ .

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ (№ 0331-2019-0025), РФФИ и города Севастополь (в рамках гранта № 18-45-920032 р\_а) и Государственного задания РФ “Наука” (в рамках проекта № FSWW-0022-2020).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 ГН 2.1.5.1315–03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. М., 2003. 94 с.
- 2 ГОСТ Р 51232–98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества. М.: Стандартинформ, 2010. 18 с.
- 3 СанПиН 2.1.4.1074–01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения. М., 2018. 125 с.
- 4 Гидрогеология СССР. Том VIII. Крым. / Под ред. Е. В. Рипского, Е. А. Ришес, В. Г. Ткачук, Н. И. Толстихина, гл. ред. акад. А. В. Сидоренко. М.: Недра, 1970. 364 с.
- 5 Гидрогеология СССР. Том VIII. Крым. Дополнения / Под ред. Е. В. Рипского, Е. А. Ришес, В. Г. Ткачук, Н. И. Толстихина, гл. ред. акад. А. В. Сидоренко. М.: Недра, 1971. 55 с.
- 6 Горобцов Д. Н., Никулина М. Е., Пендин В. В., Фоменко И. К., Козловский С. С., Черепанский М. М., Чесалов Л. Е. Оценка современного состояния месторождений подземных вод нераспределенного фонда недр Республики Крым // Геология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2017. № 6. С. 8–16.
- 7 Каюкова Е. П., Юровский Ю. Г. Водные ресурсы Крыма // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2016. № 1. С. 25–32.
- 8 Лущик А. В., Горбатюк Н. В., Морозов В. И. Водоотбор и его влияние на подземные воды пригодные для хозяйственно-питьевого водоснабжения в Крыму // Строительство и техногенная безопасность. 2016. № 12 (54). С. 83–91.
- 9 Новиков Д. А., Черных А. В., Дульцев Ф. Ф., Юрчик И. И., Сухорукова А. Ф. Особенности гидрогеохимии эксплуатируемых водоносных горизонтов Севастопольской городской агломерации // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018. Т. 2. С. 81–91.
- 10 Тарасенко В. С., Паштецкий В. С., Ляшевский В. И., Панютин В. М., Резников С. В., Тимченко З. В. Экологические проблемы водохозяйственного комплекса Украины и Крыма // Таврійський вісник аграрної науки. 2013. № 1. С. 115–119.
- 11 Шестопалов В. М., Богуславский А. С., Бублясь В. Н. Оценка защищенности и уязвимости подземных вод с учетом зон быстрой миграции. Киев: Институт геологических наук НАН Украины, 2007. 120 с.
- 12 Хващевская А. А., Новиков Д. А., Копылова Ю. Г., Сметанина И. В., Черных А. В., Дульцев Ф. Ф. Роль системы вода – порода в процессах формирования состава природных вод Севастопольской городской агломерации // Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 1. С. 118–128.
- 13 Новиков Д. А., Ничкова Л. А., Черных А. В., Дульцев Ф. Ф., Житова Л. М., Сигора Г. А. Гидрогеохимические аномалии Байдарской долины (Крымский полуостров) // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 2, № 1. С. 117–124.
- 14 Nychkova L. A., Novikov D. A., Chernykh A. V., Dultsev F. F., Sigora G. A., Khomenko T. Yu. Geochemistry of natural waters of the Baydar valley (Crimean Peninsula) // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 98, No. 01036.
- 15 Novikov D. A., Nychkova L. A., Chernykh A. V., Dultsev F. F., Pyryaev A. N., Sigora G. A., Khomenko T. Yu. Distribution of the stable isotopes ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{13}\text{C}$ ) in natural waters of the Baydar valley (Crimean Peninsula) // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 98, No. 01038.
- 16 Новиков Д. А., Черных А. В., Дульцев Ф. Ф. Новый взгляд на гидрогеологические условия города федерального значения Севастополь // Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 8. С. 105–122.
- 17 Новиков Д. А., Черных А. В., Дульцев Ф. Ф. Оценка качества подземных вод верхнеюрских отложений юго-западных районов Крымского полуострова для целей питьевого и сельскохозяйственного водоснабжения // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23, № 4. С. 52–57.
- 18 Новиков Д. А., Черных А. В., Дульцев Ф. Ф., Сесь К. В. Гидрогеология и гидрогеохимия Крымского полуострова в свете проблемы питьевого водоснабжения // Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018. С. 339–346.
- 19 Новиков Д. А., Черных А. В., Дульцев Ф. Ф. Особенности гидрогеологии верхнеюрских отложений юго-западных районов Крымского полуострова // Ученые записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. География. Геология. 2018. Т. 4 (70), № 4. С. 268–288.
- 20 Шварцев С. Л. Общая гидрогеология. М.: Недра, 1996. 423 с.
- 21 Brookins D. G. Eh-pH Diagrams for Geochemistry. Springer-Verlag. 1988. 184 p.
- 22 Dong W., Brooks S. C. Determination of the formation constants of ternary complexes of uranyl and carbonate with alkaline earth metals ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ , and  $\text{Ba}^{2+}$ ) using anion exchange method // Environ. Sci. Technol. 2006. Vol. 40 (15). P. 4639–4695.
- 23 EPA. Understanding Variation in Partition Coefficient,  $K_d$ , Values. Vol. II: Review of Geochemistry and Available  $K_d$  Values for Cadmium, Cesium, Chromium, Lead, Plutonium, Radon, Strontium, Thorium, Tritium ( $^3\text{H}$ ) and Uranium. Washington. DC: U.S. Environmental Protection Agency, 1999.
- 24 Prat O., Vercouter T., Ansoborlo E. Uranium speciation in drinking water from drilled wells in southern Finland and its potential links to health effects // Environ. Sci. Technol. 2009. Vol. 43 (10). P. 3941–3946.
- 25 Amonette J., Wilkin R. T., Ford R. G. Uranium / EPA. Monitored Natural Attenuation of Inorganic Contaminants in Ground Water. Vol. 3. Assessment for Radionuclides In-

- cluding Tritium, Radon, Strontium, Technetium, Uranium, Iodine, Radium, Thorium, Cesium, and Plutonium-Americium, // National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, OH: U. S. Environmental Protection Agency, 2010. P. 69–83.
- 26 Langmuir D., Herman J. S. The mobility of thorium in natural waters at low temperatures // *Geochim. Cosmochim. Acta* 1980. Vol. 44. P. 1753–1766.
- 27 LaFlamme B. D., Murray J. W. Solid/solution interaction: The effect of carbonate alkalinity on adsorbed thorium // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1987. Vol. 51. P. 243–250.
- 28 Ostholts E., Bruno J., Grenthe I. On the influence of carbonate on mineral dissolution: III. The solubility of microcrystalline  $\text{ThO}_2$  in  $\text{CO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$  media // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1994. Vol. 58 (2). P. 613–623.
- 29 Ostholts E. Thorium sorption on amorphous silica // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1995. Vol. 59 (7). P. 1235–1249.
- 30 Quigley M. S., Honeyman B. D., Santschi P. H. Thorium sorption in the marine environment: Equilibrium partitioning at the hematite/water interface, sorption/desorption kinetics and particle tracing // *Aquatic Geochemistry*. 1996. Vol. 1. P. 277–301.