

УДК 556+550.845

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-4-70-86

## МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В ТЕРМАЛЬНЫХ ВОДАХ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ: РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И МЕХАНИЗМЫ НАКОПЛЕНИЯ

Наталья Александровна Харитоновна<sup>1</sup>✉, Мария Андреевна Соколовская<sup>2</sup>,  
Екатерина Ивановна Барановская<sup>3</sup>, Георгий Алексеевич Челноков<sup>4</sup>,  
Александр Александрович Карабцов<sup>5</sup>, Лев Николаевич Чернощеков<sup>6</sup>,  
Иван Валерьевич Брагин<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; tchenat@mail.ru ✉

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; m.a.sokolovskaya1@gmail.com

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; baranovskaya\_kat@mail.ru

<sup>4</sup> Геологический институт РАН, Москва, Россия; geowater@mail.ru

<sup>5</sup> Дальневосточный геологический институт ДО РАН, Владивосток, Россия; karabzov@fegi.ru

<sup>6</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; chernosho@mail.ru

<sup>7</sup> Дальневосточный геологический институт ДО РАН, Владивосток, Россия; bragin\_ivan@mail.ru

**Аннотация.** Приведены новые данные о содержании и механизмах концентрирования растворенных микроэлементов (Si, Fe, F, Al, Sr, Br, B, Mn, Ba, Ti, Li, Rb, Mo, As, U, Th, W, Sc, Y, PЗЭ, Hf) в термоминеральных, поверхностных и грунтовых водах северного Тянь-Шаня (Иссык-Кульская межгорная впадина). Установлено, что микроэлементный состав термоминеральных вод является маркером гидрогеологических условий их формирования и циркуляции: воды осадочного чехла межгорного артезианского бассейна обогащены Sr, Ba, Mn, B, Mo и U, в то время как воды скальных массивов содержат повышенные концентрации F, Rb, W и Sc. Термодинамические расчеты, выполненные для определенных микроэлементов с использованием программ Visual-MINTEQ 3.1 и GWB 14, позволили выявить формы водной миграции обследованных водопунктов. Расчет коэффициента водной миграции показал зависимость скорости накопления микрокомпонентов от типа водовмещающей толщи и гидрогеологических условий формирования вод.

**Ключевые слова:** термоминеральные воды, микрокомпоненты, скальные массивы, горно-складчатые области, межгорные артезианские бассейны, Тянь-Шань

**Для цитирования:** Харитоновна Н.А., Соколовская М.А., Барановская Е.И., Челноков Г.А., Карабцов А.А., Чернощеков Л.Н., Брагин И.В. Микроэлементы в термальных водах северного Тянь-Шаня: распределение и механизмы накопления // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 4. С. 70–86.

## TRACE ELEMENTS IN THERMAL WATERS OF THE NORTHERN TIEN SHAN: DISTRIBUTION AND FATE

Natalya A. Kharitonova<sup>1</sup>✉, Marya A. Sokolovskaya<sup>2</sup>, Ekaterina I. Baranovskaya<sup>3</sup>,  
Georgiy A. Chelnokov<sup>4</sup>, Aleksander A. Karabtsov<sup>5</sup>, Lev N. Chernoshchekov<sup>6</sup>,  
Ivan V. Bragin<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; tchenat@mail.ru ✉

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; m.a.sokolovskaya1@gmail.com

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; baranovskaya\_kat@mail.ru

<sup>4</sup> Geological Institute, RAS, Moscow, Russia; geowater@mail.ru

<sup>5</sup> Far East Geological Institute, Far Eastern Branch of the RAS, Vladivostok, Russia; karabzov@fegi.ru

<sup>6</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; chernosho@mail.ru

<sup>7</sup> Far East Geological Institute, Far Eastern Branch of the RAS, Vladivostok, Russia; bragin\_ivan@mail.ru

**Abstract.** The article presents new data on the abundance and ways of soluted trace elements (Si, Fe, F, Al, Sr, Br, B, Mn, Ba, Ti, Li, Rb, Mo, As, U, Th, W, Sc, Y, REE, Hf) in thermomineral, surface and groundwaters of the northern Tien-Shan (Issyk-Kul intermountain depression). It is established that trace element composition of thermomineral waters is able to be a marker of hydrogeological settings of water formation and flow: waters of sedimentary rocks of the intermountain artesian basin are enriched with Sr, Ba, Mn, B, Mo and U, while waters of rock massifs contain increased concentrations of F, Rb, W and Sc. Thermodynamic calculations performed for certain trace elements using Visual-MINTEQ 3.1 and GWB 14 programmes allowed us to identify the water migration patterns of the surveyed water points. Calculation of water migration coefficient showed the dependence of microcomponent accumulation rate on the type of water-bearing strata and hydrogeological conditions of water formation.

**Keywords:** thermomineral waters, trace elements, rock massifs, ridge system, intermountain artesian basins, Tien Shan

**For citation:** Kharitonova N.A., Sokolovskaya M.A., Baranovskaya E.I., Chelnokov G.A., Karabtsov A.A., Chernoshchekov L.N., Bragin I.V. Trace elements in thermal waters of the northern Tien Shan: distribution and fate. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 4: 70–86. (In Russ.).

**Введение.** Отличительной чертой Центральной Азии является высокая современная тектоническая активность, ведь на этой территории выявлено обилие активных глубинных разломов с высокими амплитудами и скоростями позднечетвертичных перемещений [Трифонов и др., 2021]. Открытые обширные трещинные системы территории обеспечивают проникновение метеорных вод в недра Земли на значительную глубину, их прогрев и подъем термальных вод в верхние гидрогеологические этажи. В северо-западной части Центральной Азии, на территории северного Тянь-Шаня выявлено огромное количество минеральных вод, различных по температуре, минерализации, химическому и газовому составу [Катаева, 1969; Матыченков, Иманкулов, 1987; Chelnokov, et al., 2022]. Распределение минеральных вод по территории северного Тянь-Шаня неравномерное и практически непредсказуемое: на Киргизском хребте обнаружены и углекислые минеральные воды, и азотные маломинерализованные термы, в Восточном Прииссыккулье встречаются высокоминерализованные и маломинерализованные воды [Матыченков, 1987]. Одной из самых привлекательных территорий с точки зрения бальнеологии является область Иссык-Кульского межгорного артезианского бассейна. Здесь функционируют множество санаториев и бальнеолечебниц различного медицинского профиля, использующих в своей деятельности как естественные выходы минеральных вод, так и выводимые глубокими скважинами. Уникальность данного района обусловлена тесной ассоциацией трещинно-поровых вод артезианских бассейнов межгорного типа, вскрытых скважинами на глубине более 1 км, и низкоминерализованных трещинно-жильных вод зон тектонических нарушений скальных массивов.

Данная статья является первой статьей, посвященной формированию солевой части термоминеральных вод северного Тянь-Шаня, и в ней мы рассмотрим только микроэлементы: Si, Fe, F, Al, Sr, Br, B, Mn, Ba, Ti, Li, Rb, Mo, As, U, Th, W, Sc, Y, Hf и группу редкоземельных элементов (РЗЭ). Новейшие данные по макрокомпонентному и изотопному ( $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$ ) составу этих вод приведены нами ранее [Харитонов и др., 2023]. Основной целью статьи является детальное изучение микрокомпонентного состава 21 водопроявления термоминеральных вод северного Тянь-Шаня на примере Иссык-Кульского горного района, оценка механизмов распределения, выявление источников их поступления, механизмов и факторов мобилизации и фракционирования.

**Геология и гидрогеология района исследования.** Изучаемая территория является частью Среднеазиатского складчатого пояса и имеет сложное геологическое строение. Здесь присутствуют

метаморфические, вулканогенные и осадочные породы различного возраста, который имеет широкий диапазон: от архейского до кайнозойского. Интрузивные породы региона также разнообразны по возрасту: самые древние породы раннепротерозойского возраста, а самые молодые — палеогенового [Гидрогеология, 1971; Мандычев, 2002].

В сводном разрезе северной части Тянь-Шаня выделяется два геологических этажа: нижний сложен сильно дислоцированными осадочными, метаморфическими и магматическими отложениями домезозоя, верхний — недислоцированными и слабодислоцированными породами мезокайнозоя. Домезозойскими породами сложен фундамент впадин и синхронные им антиклинали, а мезокайнозойские отложения выполняют новейшие синклинали (рис. 1).

В соответствии с гидрогеологическим районированием изучаемая территория относится к Иссык-Кульскому артезианскому бассейну (ИАБ), который представляет собой наложенную эпигерцинскую (мезо-кайнозойскую) межгорную депрессию, развитую в пределах северо-Тянь-Шаньской каледонской складчатой системы. Отличительной чертой бассейна является наличие широко развитых трех гидрогеологических этажей, большая глубина залегания фундамента и большая мощность третьего этажа (рис. 2). Бассейн сложен мезо-кайнозойскими континентальными осадочными породами типа моласс, имеющих максимальные мощности до 5 км [Мандычев, 2002].

Современная зона конечной разгрузки подземных вод в ИАБ совпадает с его центральной тектонической зоной, соответствующей максимальному прогибу домезо-кайнозойского фундамента. Региональным базисом разгрузки подземных вод бассейна служит уровень озера Иссык-Куль. ИАБ является гидравлически закрытой гидрогеологической системой, и его краевая часть, представленная зоной адыров, широко развита и разнообразно тектонически деформирована [Мандычев, 2002].

Тектонические структуры сопровождаются тектоническими разломами как неотектонического заложения, так и обновленными в этот период времени [Кендирбаева, 2023]. Основная масса разломов является гидрогеологическим экраном, так как сосредоточена в краевых частях бассейна и образована в условиях сжатия, лишь отдельные разломы центральной части бассейна типа флексурно-разрывных зон, образованные в условиях горизонтального растяжения, могут играть роль каналов разгрузки глубинных вод. Разломы субмеридианального простирания имеют в основном северо-западное и северо-восточное простирание и отличаются меньшими амплитудами и протяжен-

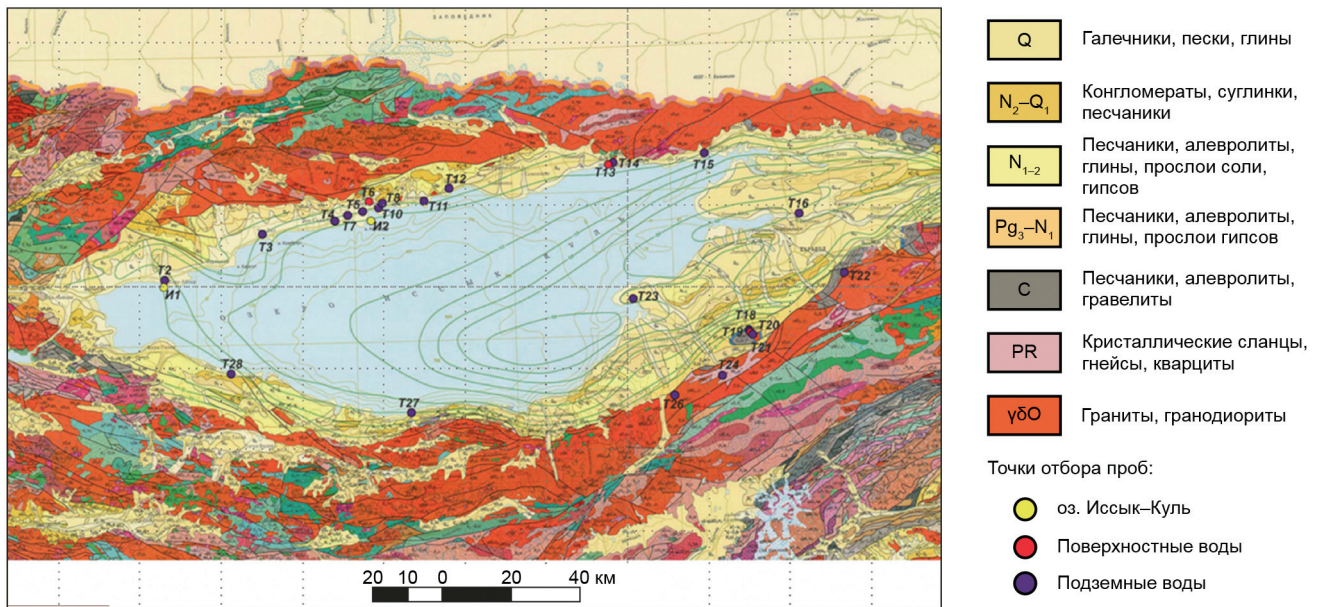


Рис. 1. Обзорная карта района исследований и расположения точек опробования. Построена на основе фрагмента геологической карты Кыргызской Республики [Жуков и др., 2008] с дополнениями и изменениями авторов

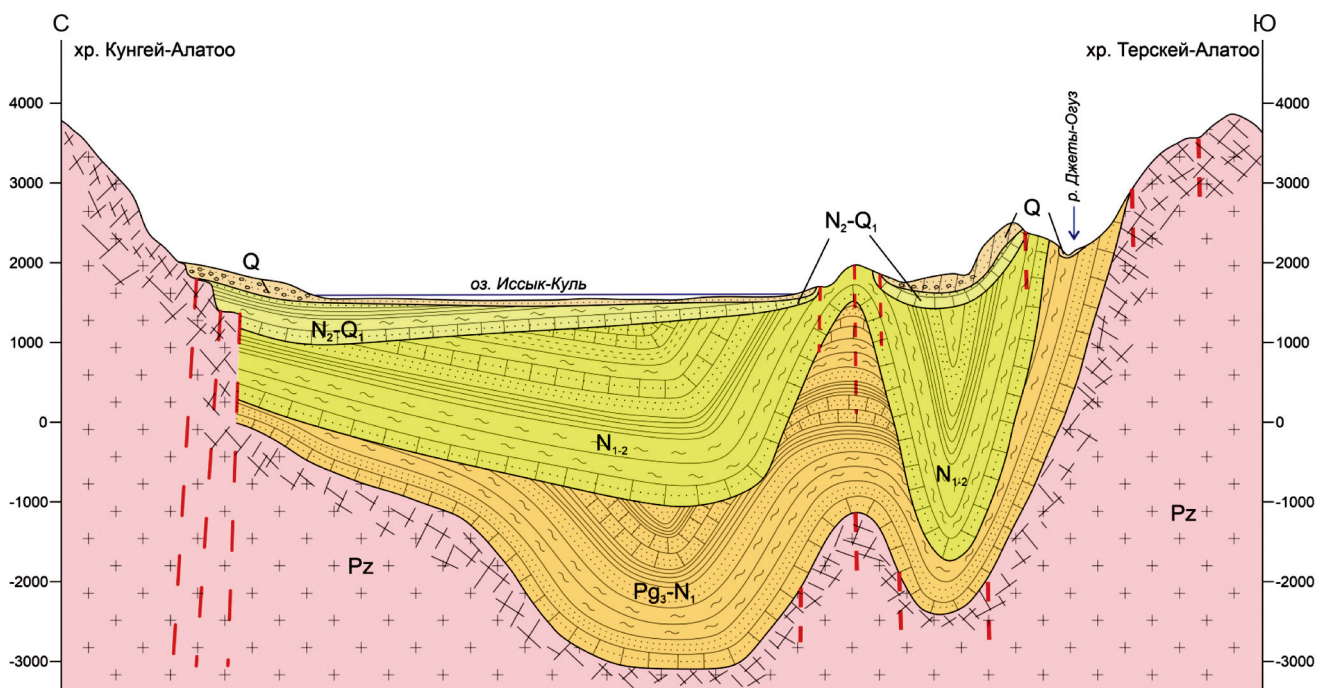


Рис. 2. Разрез через Иссык-Кульскую горную впадину. Составлено авторами на основании данных [https://geohydro.narod.ru/stat16A.htm]

ностью по сравнению с субширотными. Фильтрационные свойства осадочного чехла ИАБ ухудшаются с глубиной [Мандычев, 2002].

**Материалы и методы исследования.** В статье представлены результаты микроэлементного анализа термоминеральных и пресных вод Иссык-Кульской межгорной области (Кыргызстан). Пробы на анализ были отобраны при проведении полевых работ в июне 2023 г., во время которых были опробованы поверхностные (ручей, озеро) и подземные воды, и атмосферные осадки (рис. 1; 3). Всего было

отобрано 28 проб водной компоненты. Данные по их макросоставу, содержанию в них органического вещества и стабильных изотопов опубликованы нами в работе [Харитонов и др., 2023].

Концентрации микро- и рассеянных элементов определены в пробах воды, предварительно фильтрованных и подкисленных во время опробования, методами ICP-MS (Agilent 7700, США) и ICP-AES (iCAP 7600 Duo, США) в Центре коллективного пользования ДВГИ ДВО РАН. Содержание кремния определялось методом атомно-эмиссионной спек-



Рис. 3. Опробование скважин и минеральных источников. Вид водовмещающих толщ и вторичных фаз: а — ущелье Джети-Огуз; б — отбор проб термоминеральных вод и вторичной фазы в г. Балыкчи; в — отбор проб воды из озера Иссык-Куль; г — отбор проб термоминеральных вод в ущелье Джети-Огуз

торметрии с точностью определения не менее 10% RSD. Содержания РЗЭ оценивались напрямую без преконцентрирования, а при обработке полученных аналитических данных применялся путь математического устранения оксидных и гидроксидных интерференций при помощи математической модели внешней корректировки, для бария — оригинальной математической модели внутренней корректировки [Еловский, 2015]. Точность определения всех редкоземельных элементов, за исключением европия, не превышала 5% RSD. Точность определения Eu составляла 10% RSD.

Для корректной интерпретации поведения микрокомпонентов в водных средах необходимо знать формы их водной миграции, поскольку различные соединения одного и того же элемента имеют различные термодинамические и гидрогеодинамические параметры и характеристики, которые определяют возможность нахождения или осаждения элемента в водной среде в процессе ее движения через водовмещающие толщи [Крайнов, Швец, 1992]. В данной работе формы водной миграции были рассчитаны с использованием программных комплексов Visual Minteq 3.1. [Gustafsson, 2019] и The Geochemist's Workbench (GWB) [https://www.gwb.com]. Нами были рассчитаны только неорганические формы истинно водных фракций, т.е. тех, которые проходят через фильтр 0,45 мкм. Исходный состав гидрохимической системы задавали на основе реально определенных нами физико-химических параметров и состава природных вод, представленных в данной статье (табл. 1 и 2).

Для количественной оценки интенсивности водной миграции химических элементов и оценки степени их подвижности был использован коэффициент водной миграции ( $K_{\text{вм}}$ ), который определялся по формуле, предложенной А.И. Перельманом в 1956 г. [Перельман, 1972]:

$$K_{\text{вм}} = \frac{100 m_x}{M n_x},$$

где  $m_x$  — содержание элемента в воде,  $M$  — минерализация воды,  $n_x$  — содержание элемента в водовмещающей породе либо его кларк.

Группировка элементов по интенсивности водной миграции позволяет построить геохимическую модель, анализ которой дает возможность выделить элементы, выносящиеся из горных пород и накапливающиеся в водной среде. Чем больше компонент извлекается из водовмещающих толщ, тем выше его коэффициент водной миграции.

По интенсивности водной миграции элементы подразделены на 4 ряда. I — очень подвижные (высокоподвижные) мигранты:  $K_{\text{вм}} \approx n \cdot 10 \div n \cdot 100$ , где  $n$  — целое число; II — легкоподвижные мигранты:  $K_{\text{вм}} \approx n$ ; III — подвижные мигранты:  $K_{\text{вм}} \approx n \cdot 10^{-1}$ ; IV — слабоподвижные (инертные) мигранты:  $K_{\text{вм}} < n \cdot 10^{-1}$ .

**Результаты исследования и их обсуждение.** Химический состав опробованных вод, их температурный режим, минерализация и pH приведены в табл. 1. По температуре исследованные воды делятся на три типа: весьма холодные (до 10 °C), холодные (10÷20 °C) и термальные (> 20 °C). Все воды

Таблица 1

## Макрокомпонентный состав исследованных проб

Шифр пробы	Место отбора	Формула ионного состава
Поверхностные воды		
I <sub>1</sub>	Берег оз. Иссык-Куль	$M_{5,67} \frac{Cl_{47} SO_4 46 HCO_3 8}{Na_{70} Mg_{23} Ca_5}$ pH 8,67 T 13,7
I <sub>2</sub>	оз. Иссык-Куль, глубина около 120 м	$M_{5,54} \frac{Cl_{51} SO_4 49}{Na_{67} Mg_{26} Ca_6 K_1}$ pH 8,4 T 12
T <sub>13</sub>	Ручей у форелевой фермы	$M_{0,23} \frac{HCO_3 71 Cl_{23} SO_4 6}{Ca_{51} Na_{38} Mg_{11} K_1}$ pH 8,61 T 18,8
T <sub>20</sub>	Ручей около питьевого бювета санатория «Джети-Огуз»	$M_{0,26} \frac{Cl_{48} HCO_3 40 SO_4 12}{Ca_{49} Na_{44} Mg_6 K_1}$ pH 8,58 T 14
Подземные воды		
T <sub>2</sub>	Скв. (гл. 1150 м), пансионат «Ах-Бурах»	$M_{9,25} \frac{SO_4 73 Cl_{27}}{Na_{81} Ca_{13} Mg_6}$ pH 7,49 T 40,2
T <sub>3</sub>	Скв. (гл. 1300 м) около села Чок-Тал.	$M_{0,4} \frac{SO_4 46 HCO_3 34 Cl_{21}}{Na_{98} Ca_2}$ pH 9,83 T 37,3
T <sub>4</sub>	Термальный источник Кайнар, скв. 3954 (гл. 833 м)	$M_{0,86} \frac{SO_4 61 Cl_{22} HCO_3 17}{Na_{98} Ca_2}$ pH 9,83 T 30,7
T <sub>5</sub>	Спа-комплекс «Ак-Бермет», скв. (гл. 1515 м)	$M_{21,3} \frac{Cl_{87} SO_4 12}{Na_{83} Ca_{17}}$ pH 7,39 T 52,3
T <sub>6</sub>	Санаторий «Голубой Иссык-Куль», скв. (гл. 1000 м)	$M_{20,1} \frac{Cl_{90} SO_4 10}{Na_{68} Ca_{31}}$ pH 7,57 T 18
T <sub>7</sub>	Пансионат «Евразия», скв. (гл. > 1000 м)	$M_{1,18} \frac{SO_4 54 Cl_{38} HCO_3 8}{Na_{95} Ca_4}$ pH 8,93 T 33,9
T <sub>8</sub>	Спа-комплекс «Термаль», скв. (гл. 1500 м)	$M_{25,1} \frac{Cl_{89} SO_4 11}{Na_{79} Ca_{19} Mg_2}$ pH 7,69 T 43,2
T <sub>10</sub>	Чопон-Ата, резиденция «У Татьяны», скв. (гл. 50 м)	$M_{0,15} \frac{HCO_3 48 Cl_{42} SO_4 9}{Ca_{51} Na_{41} Mg_8 K_1}$ pH 8,28 T 16,2
T <sub>11</sub>	Пансионат «Киргизское взморье», скв. (гл. 1500 м)	$M_{35,0} \frac{Cl_{93} SO_4 7}{Na_{76} Ca_{23} Mg_1}$ pH 7,78 T 26,6
T <sub>12</sub>	Санаторий «Аврора», скв. (гл. 1500 м)	$M_{12,51} \frac{Cl_{76} SO_4 23 HCO_3 1}{Na_{90} Ca_9 Mg_1}$ pH 7,66 T 43,8
T <sub>14</sub>	с. Чон-Орукту, ист. Теремет-Суу	$M_{9,8} \frac{Cl_{98} SO_4 1 HCO_3 1}{Na_{64} Ca_{35}}$ pH 8,09 T 38
T <sub>15</sub>	с. Ой-Булак, ист.	$M_{7,83} \frac{Cl_{91} SO_4 9 HCO_3 1}{Na_{64} Ca_{35}}$ pH 8,00 T 33,5
T <sub>16</sub>	Санаторий «Джергалан», скв. (1500 м)	$M_{1,25} \frac{Cl_{79} HCO_3 11 SO_4 10}{Na_{91} Ca_8 Mg_1}$ pH 8,58 T 33,5
T <sub>18</sub>	Санаторий «Джети-Огуз», ванный комплекс, скв.	$M_{15,3} \frac{Cl_{95} SO_4 5}{Na_{58} Ca_{42}}$ pH 7,71 T 32
T <sub>19</sub>	Санаторий «Джети-Огуз», питьевой бювет, скв.	$M_{2,06} \frac{Cl_{73} SO_4 25 HCO_3 2}{Na_{66} Ca_{34}}$ pH 8,51 T 17,9
T <sub>21</sub>	Санаторий «Джети-Огуз», скв.	$M_{0,38} \frac{Cl_{58} SO_4 36 HCO_3 6}{Na_{70} Ca_{29} K_1}$ pH 9,15 T 22
T <sub>22</sub>	Санаторий Ак-Суу, «Теплоключенка», скв.	$M_{0,39} \frac{Cl_{38} SO_4 36 HCO_3 26}{Na_{93} Ca_6 K_1}$ pH 9,15 T 48
T <sub>23</sub>	Село Кирпичное, ист. Кызыл-Суу, скв. 6732 (гл. 1960 м)	$M_{0,38} \frac{HCO_3 48 Cl_{28} SO_4 26}{Na_{96} Ca_4}$ pH 9,27 T 40,3
T <sub>24</sub>	с. Чон-Кызыл-Суу, ист.	$M_{0,51} \frac{Cl_{54} SO_4 24 HCO_3 22}{Na_{87} Ca_{12} K_1}$ pH 9,44 T 28,4
T <sub>26</sub>	Ущелье Джууку, гостевой дом, ванный комплекс «Джууку-Жылуу-Суу»	$M_{0,35} \frac{SO_4 41 Cl_{32} HCO_3 27}{Na_{82} Ca_{17} K_1}$ pH 8,93 T 37,9
T <sub>27</sub>	с. Каджи-Сай, Спа-комплекс «Ысык-Суу», скв. (гл. 1630 м)	$M_{2,45} \frac{Cl_{43} SO_4 31 HCO_3 26}{Na_{98} Ca_2}$ pH 8,01 T 43,4
T <sub>28</sub>	Дом отдыха «Бар-булак», ванный комплекс, скв. (гл. 1400 м)	$M_{5,23} \frac{Cl_{78} SO_4 22 HCO_3 1}{Na_{77} Ca_{22}}$ pH 8,18 T 38,6

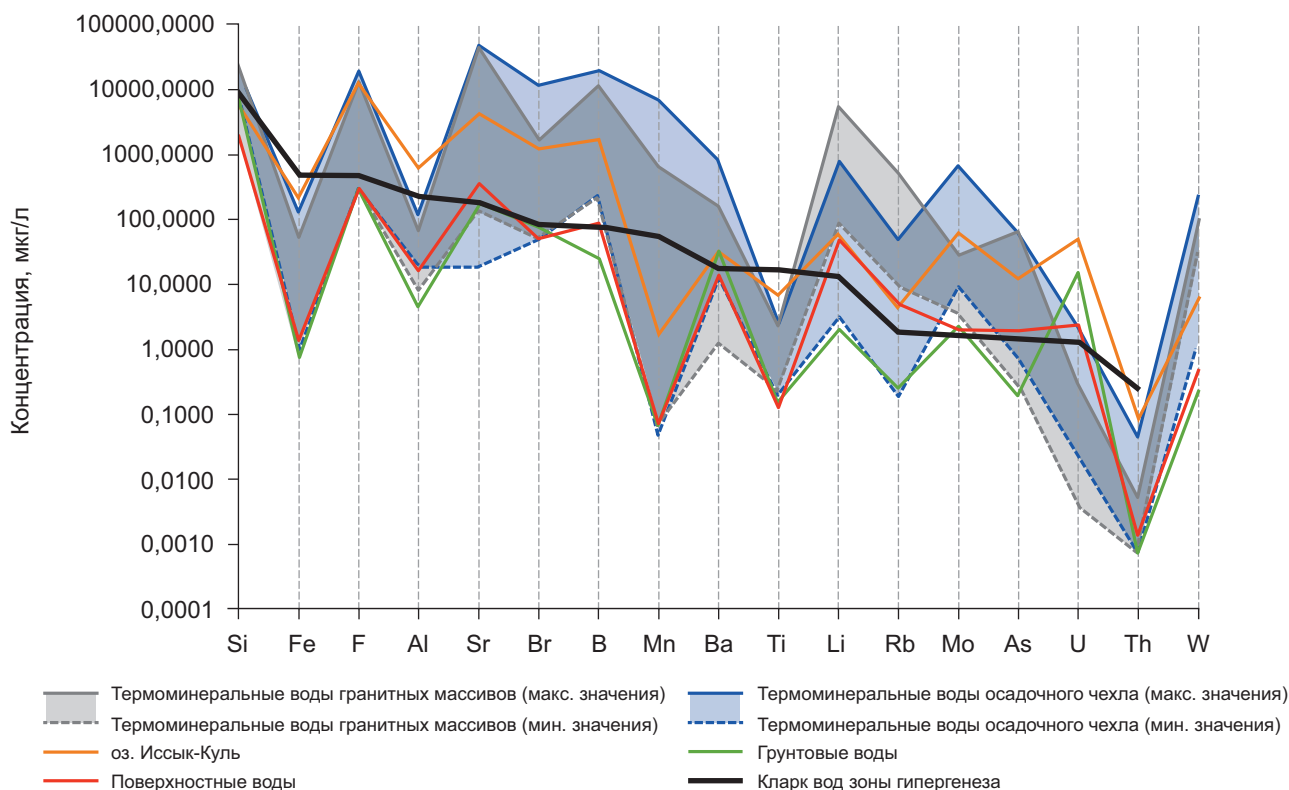


Рис. 4. Распределение микрокомпонентов в природных водах Иссык-Кульской горной впадины

умеренно-щелочные с рН, варьирующим от 6,7 до 9,4. Окислительно-восстановительный потенциал неоднородный и зависит от типа воды — поверхностные водотоки демонстрируют положительные Eh значение в диапазоне 100÷220 мВ, в то время как подземные источники показывают сильно восстановительную обстановку с Eh до -164 мВ (табл. 2).

Поверхностные воды и воды горных массивов обычно низкоминерализованные (минерализация редко превышает 500 мг/л), а термоминеральные воды осадочного чехла содержат значительно больше солевой компоненты, минерализация составляет более 1,1 г/л, часто находится в диапазоне значений от 10 до 20 г/л, иногда достигая 35 г/л (как в точке T<sub>11</sub>). Корреляция глубины циркуляции термоминеральных вод с их минерализацией не установлена (табл. 1 и 2). Насыщенность газом изученных термоминеральных вод также неоднородна и меняется по отдельным участкам и скважинам [Харитонова и др., 2023].

Состав изучаемых подземных вод варьирует и зависит от комплекса параметров: температуры, глубины циркуляции и типа водовмещающих толщ. В холодных водах среди катионов преимущественно преобладают Ca<sup>2+</sup> и Na<sup>+</sup>, а среди анионов HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, редко Cl<sup>-</sup>. В термальных водах осадочного чехла картина иная Na<sup>+</sup> > Ca<sup>2+</sup> и Cl<sup>-</sup> >> HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> + SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Разделение вод на группы по температурному признаку описано нами в [Харитонова и др., 2023]. В целом, с ростом минерализации повышается сульфатность и хлоридность термоминеральных вод.

**Микрокомпоненты.** Результаты микрокомпонентного состава представлены в табл. 2, и они сильно варьируют в зависимости от точки опробования (рис. 4). Жирным шрифтом в таблице выделены концентрации элементов, значительно превышающие кларковые значения.

В целом, воды характеризуются невысоким содержанием кремния: значения концентраций элемента (как Si) находятся в диапазоне 1,53÷23,67 мг/л (табл. 2, рис. 4). Наименьшие содержания элемента характерны для поверхностных водотоков (≈ 2,02 мг/л); в водах озера Иссык-Куль и грунтовых водах содержания кремния примерно равные — 5,54÷6,81 мг/л. В термоминеральных водах, за исключением трех точек T<sub>19</sub>, T<sub>23</sub> и T<sub>26</sub>, содержания кремния в 1,5–3,0 раза выше, чем кларк элемента в водах зоны гипергенеза. Наибольшие концентрации выявлены в водах точек опробования T<sub>5</sub>, T<sub>6</sub>, T<sub>8</sub>, T<sub>11</sub> и T<sub>12</sub>. При прочих равных, уровень кремния в подземных водах осадочного чехла межгорного артезианского бассейна выше, чем в водах скальных массивов, что указывает на лучшее растворение кремнистых фракций осадочного чехла в сравнении с монолитными толщами.

Распределение фтора в изученных водах весьма неоднородно — наименьшие значения на уровне кларка элемента в водах зоны гипергенеза отмечены для поверхностных вод, а также грунтовых вод (табл. 2; рис. 4). В водах озера Иссык-Куль наблюдается повышенная концентрация фтора (≈ 12 мг/л), что почти в десять раз выше, чем кларк морской воды

Таблица 2

## Содержание микроэлементов в природных водах изучаемого района

№	Характеристика воды	pH	Еh, мВ	М, г/л	Si	мг/л										U	Th				
						F	Br	Sr	B	Al	Fe	Ba	Mn	Li	Mo			Rb	As	W	Ti
И1	оз. Иссык-Куль	8,67	-91,0	5,67	5,95	12,30	1,24	4,34	1,70	621,22	210,32	33,07	1,69	61,77	53,71	4,56	12,34	5,99	5,77	49,12	0,086
И2				5,54	5,54	12,60	0,05	4,46	1,89	70,30	20,59	34,58	0,29	64,49	56,85	4,00	12,97	5,12	2,10	49,05	0,004
T20	Поверхностные воды	8,58	-84,0	0,26	2,02	0,30	0,05	0,35	0,09	16,10	1,35	13,69	0,07	47,82	2,09	5,15	1,98	0,47	0,12	2,41	0,001
T10	Грунтовые воды	8,28	-68,2	0,15	6,81	0,30	0,08	0,17	0,03	4,57	0,81	31,66	0,07	2,09	2,33	0,25	0,20	0,23	0,14	15,62	0,001
T13			8,61	-89,5	0,23	5,75	0,30	0,05	0,09	0,03	5,22	0,87	15,81	0,22	1,04	2,71	0,22	4,32	1,01	0,13	4,93
T2		7,49	-26,6	9,25	12,23	0,30	0,05	7,13	5,78	23,64	7,21	23,00	137,39	210,66	121,86	9,35	25,58	1,32	0,61	0,11	0,003
T3			9,83	-164,4	0,40	19,66	3,16	0,05	0,02	0,24	53,61	0,94	11,22	0,05	3,16	13,20	0,20	61,38	5,62	0,20	0,11
T4		9,19	-123,6	0,86	14,13	6,71	0,05	0,05	3,24	37,90	4,23	15,88	0,12	14,59	48,49	0,43	35,10	36,05	0,39	1,40	0,001
T5			7,39	-19,3	21,30	21,90	0,30	11,00	19,74	18,06	58,35	20,51	109,98	184,36	351,62	269,79	16,06	1,11	1,58	1,45	0,16
T6		7,57	-29,0	20,10	14,67	0,30	8,80	32,88	9,40	67,24	24,36	145,86	122,60	195,84	52,50	13,54	1,05	2,07	0,91	0,22	0,011
T7		Межгорный бассейн,	8,93	-114,8	1,18	14,51	13,50	0,05	0,10	7,93	48,04	9,01	23,67	1,50	25,43	57,00	0,57	5,13	26,97	1,05	0,45
T8	пластовые воды	7,69	-38,8	25,10	14,19	0,30	10,00	46,94	14,36	58,40	17,14	85,92	389,62	354,88	159,90	9,59	0,71	2,09	1,47	0,76	0,009
T11			7,78	-42,0	35,00	19,28	0,30	11,60	43,54	15,00	89,16	84,26	98,13	6968,31	348,90	9,10	10,37	18,86	2,18	2,37	0,04
T12		7,66	-36,8	12,51	16,46	0,30	3,28	6,85	19,44	30,91	13,97	46,63	216,86	157,43	674,62	12,09	1,20	4,13	0,85	2,22	0,008
T14			8,09	-59,6	9,80	13,39	2,16	1,88	9,78	3,57	115,19	7,53	829,22	22,21	29,57	42,36	7,07	5,44	6,32	0,49	0,04
T15		8,00	-55,9	7,83	10,39	2,32	0,05	11,27	2,90	76,94	5,06	96,21	14,76	59,39	60,81	4,95	0,82	3,90	0,55	0,02	0,003
T27			8,01	-51,8	2,45	20,72	19,20	0,05	0,16	4,21	22,99	127,49	48,58	50,95	149,63	138,18	36,36	26,29	226,73	0,98	0,80
T28		8,18	-67,4	5,23	13,78	2,86	0,05	5,82	2,69	55,72	34,68	153,21	50,18	778,46	42,34	49,34	16,57	78,47	2,36	0,03	0,045
T16			8,58	-90,0	1,25	10,10	5,86	0,48	0,48	0,46	18,85	4,14	260,54	20,03	30,78	100,01	0,84	0,90	24,23	0,53	0,02
T18	Скальные массивы,	7,71	-37,5	15,30	23,67	0,30	1,64	43,44	11,33	20,88	15,89	157,25	652,11	5538,96	10,03	499,10	65,45	40,99	0,82	0,05	0,005
T19			8,51	-81,2	2,06	1,53	3,32	0,05	4,19	1,69	56,85	15,55	25,59	102,96	829,89	3,59	46,95	1,94	54,52	1,66	0,00
T21	трещинно-жилльные воды	9,15	-134,9	0,38	17,24	6,34	0,13	1,07	0,75	13,37	54,22	20,87	48,28	293,95	11,05	9,68	13,24	95,25	2,49	0,28	0,002
T22			9,15	-130,2	0,39	10,53	13,00	0,05	0,20	0,22	26,72	1,63	5,82	0,07	152,05	28,19	13,11	8,61	74,97	0,24	0,02
T23		9,27	-132,4	0,38	2,02	11,70	0,05	0,09	0,47	50,11	2,15	10,82	0,03	2,97	16,42	0,75	24,04	31,67	0,23	0,28	0,001
T24			9,44	-139,1	0,51	10,53	10,70	0,10	0,47	0,80	8,54	3,38	5,99	0,49	235,84	21,81	47,25	0,30	76,60	0,27	0,13
T26	Кларк вод зоны гипергенеза	8,93	-112,1	0,35	2,02	10,90	0,05	0,14	0,27	7,97	4,92	1,32	2,91	89,89	12,80	14,91	0,61	72,60	0,25	0,01	0,001
					8,35	0,48	0,09	0,18	0,08	0,08	226,00	481,00	18,30	54,50	13,00	1,75	1,85	1,46	1,00	17,40	1,31
	Кларк морской воды				2,10	1,30	0,67	8,10	4,45	1,00	3,40	21,00	0,40	170,00	10,00	120,00	2,60	2,00	1,00	3,30	0,001

для данного элемента. В подземных водах осадочного чехла межгорного артезианского бассейна, за исключением точек  $T_{17}$  и  $T_{27}$ , наблюдается низкий уровень элемента с диапазоном вариативности  $0,3 \div 3,1$  мг/л. В двух точках  $T_4$  и  $T_{16}$  выявлено незначительное повышение до  $5,86 \div 6,71$  мг/л. Для водопунктов  $T_7$  и  $T_{27}$  характерно весьма высокое содержание фтора, которое более чем в 10 раз превышает кларк морской воды. В целом, оно близко к значению  $F^-$  в озере Иссык-Куль. В водах, циркулирующих в скальных массивах, повсеместно отмечается повышенное содержание фтор-иона ( $3,32 \div 13,0$  мг/л), с максимальным значением  $13,0$  мг/л в точке  $T_{22}$ . Источником фтора в термальных водах скальных массивов являются фтор-содержащие слюды. Значимая корреляция фтора и кремнекислоты указывает на один источник обоих компонентов.

В изучаемых водах содержание брома практически повсеместно невысокое, и часто ниже, чем кларк элемента в морской воде (табл. 2; рис. 4). Сверхнизкие концентрации — на уровне кларка ( $0,09$  мг/л) в водах зоны гипергенеза отмечены в поверхностных и грунтовых водах, в термоминеральных водах скальных массивов, и в некоторых точках глубоких вод осадочных толщ (табл. 2; рис. 4). Высокие уровни содержания элемента (более чем в 100 раз превышающие кларк зоны гипергенеза) обнаружены лишь в четырех точках термоминеральных вод осадочного чехла, а именно:  $T_5$ ,  $T_6$ ,  $T_8$  и  $T_{11}$ . Однако даже в этих точках порог по бромю как бальнеокомпоненту не достигнут. Эти пять проб демонстрируют и очень высокие содержания таких элементов как стронций ( $> 100$  раз кларка элемента для вод зоны гипергенеза), бор ( $9,4 \div 18,1$  мг/л), железо суммарное ( $17 \div 84$  мкг/л), барий ( $85,9 \div 145,9$  мкг/л), марганец ( $122 \div 6968$  мкг/л), литий ( $195,84 \div 354,88$  мкг/л), рубидий ( $9,6 \div 16,6$  мкг/л). В точках  $T_5$  и  $T_8$  также выявлены высокие значения молибдена ( $159 \div 269,8$  мкг/л). Все эти водопункты расположены в районе населенного пункта Чолпон-Ата в зоне сочленения осадочного чехла со скальными массивами хребта Кюнгей Алатау. Значимая корреляция в паре  $Cl-Br$  ( $r=0,7$ ) для проб  $T_3$ ,  $T_6$ ,  $T_8$ ,  $T_{11}$ ,  $T_{12}$ ,  $T_{14}$  указывает на единый источник элементов, видимо, это испарительное концентрирование исходных морских рассолов. В остальных пробах источником элемента являются водовмещающие толщи с невысокими содержаниями элемента.

Содержание стронция в исследуемых водах значительно варьирует: минимальные концентрации элемента характерны для поверхностных вод, грунтовых вод и вод скальных массивов (табл. 2; рис. 4). В пластовых водах осадочного чехла концентрации стронция сильно изменяются от  $0,02$  до  $46,94$  мг/л и регулируются составом водовмещающих толщ. Самые большие уровни элемента выявлены в водопунктах  $T_5$ ,  $T_6$ ,  $T_8$ ,  $T_{11}$ ,  $T_{18}$ , выводящих соленые воды сульфатно-хлоридного кальциево-натриевого состава. Вероятным источником стронция здесь

являются карбонатные и сульфатные породы, слагающие водовмещающие толщи.

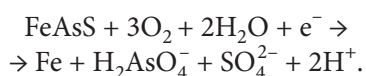
Суммарное железо, в целом, демонстрирует низкие содержания во всех изученных водах и не представляет никакого бальнеологического интереса. Концентрации железа повсеместно в два раза ниже, чем кларк элемента в водах гипергенеза (табл. 2; рис. 4). Наибольшие содержания  $Fe_{общ}$  выявлены в приповерхностных водах озера Иссык-Куль ( $210,32$  мкг/л), а также в водопунктах  $T_{27}$  ( $127,49$  мкг/л) и  $T_{11}$  ( $84,26$  мкг/л). В целом, в минеральных водах скальных массивов уровень концентраций  $Fe_{общ}$  на порядок ниже, чем в пластовых водах ИАБ.

Количество марганца в изученных водах не превышает кларк элемента для вод зоны гипергенеза и преимущественно очень низкое  $0,07 \div 2,91$  мкг/л, либо низкое  $15 \div 51$  мкг/л (табл. 2, рис. 4). Только в семи водопунктах содержания достигают первых сотен мкг/л. Очень высокие концентрации элемента зафиксированы в пробе  $T_{11}$  ( $6,97$  мг/л). В этой же пробе определены высокие содержания  $Fe_{общ}$ ,  $Va$ ,  $Li$  и  $Rb$ . В целом, наблюдается значимая корреляция между содержанием в водах железа и марганца. Стоит отметить, что в термоминеральных водах скальных массивов марганца содержится на два порядка меньше, чем в водах осадочного чехла. Источником марганца и железа в водах осадочного чехла являются карбонатные толщи, которые содержат повышенные содержания обоих компонентов.

Содержание мышьяка ( $As_{общ}$ ) сильно варьирует между водопунктами (табл. 2, рис. 4): наименьшая концентрация характерна для поверхностных и грунтовых вод данной территории (до  $4,32$  мкг/л), а максимальное значение выявлено в точках  $T_3$  и  $T_{18}$  и составляет  $61,38$  и  $65,45$  мкг/л соответственно. По характеру распределения все изученные воды подразделяются на две большие группы: в первую группу попадают водопункты ( $T_5, T_6, T_7, T_8, T_{12}, T_{14}, T_{15}, T_{16}, T_{19}, T_{24}, T_{26}$ ) с низкими концентрациями элемента, находящимися в диапазоне значений  $0,2 \div 5,2$  мкг/л, что близко к уровню кларка элемента в водах зоны гипергенеза, а во второй группе (водопункты  $T_2, T_3, T_4, T_{11}, T_{18}, T_{27}, T_{28}, T_{21}, T_{19}, T_{23}$ ) выявлены весьма значительные содержания  $As_{общ}$  с диапазоном  $12,2 \div 65,45$  мкг/л, превышающие кларковые значения в десятки раз. Стоит отметить и значительные содержания валого мышьяка (в районе  $12$  мкг/л) в водах озера Иссык-Куль. Никаких корреляционных связей между парами минерализация —  $As_{общ}, Fe_{общ}$  —  $As_{общ}$ , условия формирования —  $As_{общ}$  не выявлено. По нашему мнению, нет единого генезиса мышьяка в термоминеральных водах Иссык-Кульской межгорной впадины, однако можно выделить два возможных источника. В водах скальных массивов повышенные содержания мышьяка обусловлены растворением мышьяксодержащих сульфидов (арсенопирит) согласно следующей реакции:

Распределение Sc, Y, RЭЭ и Hf в природных водах северной части Тянь-Шаня

№	Характеристика воды	pH	Eh, мВ	M, г/л	Sc	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tь	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf
И1	оз. Иссык-	8,67	-91,0	5,67	0,19162	0,06997	0,05108	0,17805	0,01259	0,04238	0,00921	0,00541	0,01222	0,00158	0,00635	0,00264	0,00518	0,00120	0,00809	0,00173	0,04258
И2	Куль	8,58	-84,0	5,54	0,06830	0,04388	0,01116	0,01763	0,00244	0,01103	0,01129	0,00570	0,00787	<0,00061	0,00523	0,00122	<0,0022	0,00043	0,00412	<0,00091	0,00618
T20	Поверхностные воды	8,58	-84,0	0,26	0,01883	0,00885	0,00544	0,00307	0,00090	0,00409	0,00104	0,00191	0,00128	0,00010	0,00129	0,00023	0,00041	0,00018	0,00066	0,00013	0,00073
T10	Грунтовые воды	8,28	-68,2	0,15	0,04292	0,01736	0,00839	0,00224	0,00132	0,00700	0,00163	0,00436	0,00175	0,00009	0,00135	0,00038	0,00117	0,00020	0,00099	0,00024	0,00051
T13		8,61	-89,6	0,23	0,03761	0,00844	0,00267	0,00280	0,00064	0,00312	0,00134	0,00208	0,00135	0,00013	0,00065	0,00021	0,00053	0,00011	0,00047	0,00011	0,00037
T2		7,49	-26,6	9,25	0,06377	0,03276	0,00680	0,01007	0,00146	0,01042	0,00829	0,00341	0,01278	0,00167	0,00490	<0,00053	0,00525	<0,0015	0,00811	<0,00012	0,00957
T3		9,83	-164,4	0,40	0,09877	0,00069	0,00110	0,01070	0,00020	0,00087	0,00068	0,00155	0,00062	0,00006	0,00027	0,00009	0,00022	0,00003	0,00040	0,00009	0,00042
T4		9,19	-123,5	0,85	0,05437	0,00298	0,00269	0,00346	0,00046	0,00228	0,00073	0,00224	0,00100	0,00008	0,00094	0,00011	0,00042	<0,000035	<0,00052	0,00013	0,00116
T5		7,39	-19,3	21,30	0,12615	0,09020	0,02897	0,02447	0,00341	0,01458	0,01677	0,01084	0,02551	0,00196	0,01280	0,00110	0,00420	<0,0032	0,01682	0,00260	0,01217
T6		7,57	-29,0	20,10	0,26128	0,14548	0,04897	0,01127	0,00269	0,01729	-	0,00869	0,01631	0,00228	0,01182	0,00248	0,00812	-	0,01822	0,00368	0,02448
T7		8,93	-114,8	1,18	0,06763	0,00272	0,00504	0,01176	0,00099	0,00421	0,00098	0,00331	0,00127	0,00011	0,00055	0,00028	0,00039	0,00009	<0,0007	0,00016	0,00451
T8		7,69	-38,8	25,10	0,10602	0,19446	0,01437	0,02149	0,00272	0,01879	0,01370	0,00895	0,02780	0,00388	0,01181	0,00225	0,01282	0,00460	<0,019	0,00338	0,01696
T11		7,78	-42,0	35,00	0,28195	0,16669	0,02321	0,10990	0,00549	0,04037	0,03199	0,00764	0,03268	0,00699	0,02062	0,00297	0,02067	<0,0058	<0,028	0,00470	0,01856
T12	7,66	-36,8	12,51	0,08732	0,03147	0,00818	0,01189	0,00221	0,01215	0,00713	0,00598	0,01576	0,00120	0,00551	0,00167	0,00735	<0,002	<0,0099	0,00160	0,00850	
T14	8,09	-59,6	9,80	0,11531	0,08751	0,02503	0,00659	0,00104	0,00643	0,00568	0,03732	0,01463	0,00105	0,00240	0,00129	0,00343	<0,0013	0,00853	0,00126	0,00777	
T15	8,00	-55,9	7,83	0,09644	0,04967	0,01920	0,01783	0,00182	0,00810	0,00434	0,00461	0,00733	0,00093	0,00267	0,00094	0,00247	<0,0011	0,00625	0,00091	0,01579	
T27	8,01	-51,8	2,45	0,07618	0,00581	0,00499	0,00835	0,00089	0,00321	0,00400	0,00605	0,00284	0,00025	0,00165	0,00046	0,00091	0,00021	<0,0016	0,00036	0,00934	
T28	8,18	-67,4	5,23	0,13057	0,04103	0,01951	0,04181	0,00377	0,01575	0,00697	0,01850	0,00859	0,00049	0,00210	0,00059	0,00170	<0,0002	<0,0031	0,00070	0,02805	
T16	8,58	-90,0	1,25	0,05997	0,01421	0,01162	0,01165	0,00120	0,00715	0,00526	0,03309	0,00838	0,00013	0,00132	0,00020	0,00048	0,00015	0,00081	0,00024	0,00587	
T18	7,71	-37,5	15,30	0,17213	0,15875	0,01369	0,02314	0,00329	0,01826	0,00610	0,01011	0,01907	0,00190	0,00818	0,00081	0,00808	<0,0022	<0,011	0,00232	0,00914	
T19	Скальные массивы, трещинно-жилые воды	8,51	-81,2	2,06	0,08349	0,02934	0,00640	0,01051	0,00089	0,00464	0,00169	0,00364	0,00400	0,00020	0,00088	0,00039	0,00072	0,00020	0,00130	0,00029	0,00614
T21		9,15	-134,9	0,38	0,07435	0,02279	0,00470	0,00712	0,00072	0,00352	0,00166	0,00275	0,00221	0,00017	0,00160	0,00030	0,00091	0,00015	0,00092	0,00012	0,00190
T22		9,15	-130,2	0,39	0,10091	0,00227	0,00107	0,00180	0,00016	0,00105	0,00051	0,00088	0,00076	0,00006	0,00045	0,00008	0,00022	0,00007	<0,0004	0,00009	0,00172
T23		9,27	-132,4	0,38	0,06206	0,00232	0,00133	0,00216	0,00022	0,00105	0,00058	0,00115	0,00103	0,00008	0,00008	0,00035	0,00008	0,00022	0,00008	0,00042	0,00009
T24	9,44	-139,1	0,51	0,13268	0,00520	0,00197	0,00308	0,00047	0,00181	0,00103	0,00097	0,00062	0,00008	0,00008	0,00057	0,00016	0,00033	0,00005	0,00050	0,00009	0,00127
T26	8,93	-112,1	0,35	0,08869	0,00120	0,00124	0,00227	0,00026	0,00099	0,00065	0,00019	0,00055	0,00006	0,00006	0,00027	0,00008	0,00022	0,00003	0,00040	0,00009	0,00065
Северо-Американский сланец <sup>1</sup>					27,00000	32,00000	73,00000	7,90000	33,00000	5,70000	1,24000	5,20000	0,85000	5,80000	1,04000	3,40000	0,50000	0,50000	3,10000	0,48000	-
Водовмещающие породы (гранит), г/т					21,453	32,509	22,949	61,426	9,4118	45,917	10,148	2,1239	9,0948	1,2936	7,2622	1,3166	1,3166	0,48159	3,0199	0,4082	0,528
Водовмещающие породы (алевролит)					13,2088	17,3358	12,056	26,7382	3,5718	16,5371	4,183	0,8998	3,9072	0,5966	3,4287	0,6547	1,9838	0,2592	1,7481	0,2579	2,8752



В пластовых водах осадочного чехла высокий уровень  $\text{As}_{\text{общ}}$  вызван его выщелачиванием из угольных пластов в триасово-юрских отложениях, широко распространенных в Южно-Иссыккульском районе.

Содержание бария (Ba) в изученных водопунктах очень сильно варьирует, разброс крайних значений составляет несколько порядков от 1,32 до 829,22 мкг/л. Минимальные концентрации Ba первые мкг/л (табл. 2; рис. 4) выявлены в термоминеральных водах скальных массивов (водопункты  $T_{22}$ ,  $T_{24}$ ,  $T_{26}$ ). Поверхностные и грунтовые воды демонстрируют содержания бария близкие к его кларку в водах гипергенеза. В пластовых термоминеральных водах ИАБ можно выделить две группы термоминеральных вод: в первой концентрация Ba колеблется в пределах 11÷48 мкг/л, а во второй — 96÷157 мкг/л. И особняком выделяется точка  $T_{14}$  с максимальными концентрациями 829,22 мкг/л. Микрокомпонентный состав различных образцов водовмещающих пород показывает, что воды с повышенным содержанием бария формируются в прослоях карбонатных толщ (табл. 3) — карбонатные породы содержат барий в высоких концентрациях (до 33,16 кг/т). Среди карбонатных фаз выявлено значительное количество карбоната бария (витерита).

Содержание рубидия в термоминеральных водах Иссык-Кульской межгорной впадины обычно выше, чем кларк элемента в водах зоны гипергенеза во всех пробах, за исключением грунтовых вод, четырех водопунктов осадочного чехла и одного водопункта скального массива (табл. 2, рис. 4). В пробе  $T_{18}$  (месторождение Джети-Огуз) диагностированы высокие содержания элемента 499,1 мкг/л. В этой же пробе зафиксированы повышенные содержания лития и стронция. Такие высокие концентрации элементов в данном водопункте обусловлены активным их извлечением из скальных водовмещающих толщ, которые обогащены данными компонентами. В целом, нет связи pH и минерализации вод, а также температурного режима с содержанием рубидия. Его высокие концентрации регулируются только локальным содержанием в водовмещающих породах.

В изучаемых водах достаточно часто обнаруживались высокие концентрации вольфрама, максимальное значение выявлено в точке  $T_{27}$ . В целом, в термоминеральных водах скальных массивов содержания W почти на два порядка выше, чем кларк данного элемента в водах зоны гипергенеза. Концентрации вольфрама в исследованных водах имеют хорошую прямую корреляционную связь с pH раствора, и обратную — с минерализацией. Для многих проб независимо от их гидрогеологических характеристик выявлена прямая связь в паре железо-вольфрам, что указывает на вольфрамит ( $(\text{FeMn})\text{WO}_4$ ) как на источник обоих компонентов.

Количество алюминия различается в зависимости от точки отбора пробы, однако в целом оно невысокое, находится в районе первых десятков мкг/л и не превышает кларк элемента в водах зоны гипергенеза (табл. 2).

Все исследованные термоминеральные источники обеднены ураном и торием, содержания данных элементов в 10 раз ниже, чем их кларки в водах зоны гипергенеза. Высокие концентрации урана в районе 50 мкг/л диагностированы в водах озера Иссык-Куль, в поверхностных водах содержания примерно равны кларку элемента, а данные по грунтовым водам показывают диаметрально противоположные результаты.

*Лантаноиды, иттрий, скандий и гафний.* Редкоземельные элементы (РЗЭ) — это семейство 15 химических элементов периодической системы (от лантана до лютеция), часто в эту группу включают еще имеющие сходные химические свойства скандий и иттрий. Содержания РЗЭ в исследованных водах низкие и находятся в диапазоне значений 0,07÷0,81 мкг/л (табл. 4). В целом, наблюдается классическая зависимость содержания суммы РЗЭ от pH воды — чем выше pH, тем ниже концентрации РЗЭ (рис. 5). Минимальные концентрации РЗЭ наблюдаются в водах с высоким pH (8,1–9,7), а максимальные коррелируют с интервалом pH 7,3–7,9. Выпадают из общего тренда две точки  $I_1$  и  $T_{11}$ , которые демонстрируют значительное обогащение РЗЭ 0,334 и 0,341 мкг/л, соответственно. Минимальные концентрации РЗЭ выявлены в водах скальных массивов. Сопоставление суммарного содержания РЗЭ и минерализации вод показывает неплохую корреляционную связь. Легкие РЗЭ (от La до Eu) доминируют над тяжелыми РЗЭ (от Gd до Lu), а максимальное содержание имеют La, Ce и Nd. Наблюдаемые различия в  $\Sigma\text{РЗЭ}$  в изучаемых термоминеральных водах обусловлены типом водовмещающих толщ, а также скоростью движения подземных вод и временем их циркуляции. Содержания скандия в водах достаточно хорошо коррелируются с концентрациями РЗЭ: в пробах, обогащенных РЗЭ, фиксируется повышенное содержание Sc. Исключение составляют пробы  $T_3$ , а также термоминеральные воды из скальных массивов в водопунктах  $T_{19-23}$ . В них фиксируются низкие уровни РЗЭ, при высоких концентрациях Sc. Содержание гафния во всех пробах низкое, повышенные значения выявлены только в пробах  $T_6$  и  $T_{28}$ .

*Формы водной миграции компонентов.* Моделирование форм водной миграции показало, что основные катионы во всех пробах мигрируют преимущественно в виде ионов металлов:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ . Подобным образом ведут себя и некоторые микрокомпоненты:  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ . Лишь небольшая доля водных фракций приходится на их комплексные соединения. Стоит отметить, что при прочих равных наименьший процент комплексных соединений образует натрий, далее следуют калий, рубидий и литий, а наибольший — кальций и магний. Для алюминия в рассматриваемых подземных

Таблица 4

## Содержание микрокомпонентов в различных типах водовмещающих толщ северной части Тянь-Шаня, г/т

№ пробы	Порода	Li	As	Rb	Sr	Mo	Cs	Ba	W	Th	U	Sc	Hf
KG-23_AkCy	Гранит	9,11	0,96	238,11	238,16	0,14	9,51	667,21	0,53	30,06	8,01	1,48	1,29
KG-23_Дж_Ог_2	Известняк	3,58	1,92	0,67	1367,67	0,07	0,08	33157,18	4,21	0,10	0,28	0,37	0,05
KG-23_Дж_Ог_4	Монцодиорит	20,59	3,19	166,23	351,56	0,26	1,21	1896,77	1,91	3,49	0,75	21,45	0,53
KG-23_Дж_Ог_5	Аплит	6,58	2,52	190,85	150,73	0,14	3,23	1328,07	0,81	10,56	1,44	5,27	1,90
KG-23_Дж_Ог_6	Алевролит	65,18	8,14	78,41	146,58	0,19	7,68	467,80	1,38	7,93	2,84	13,21	2,88

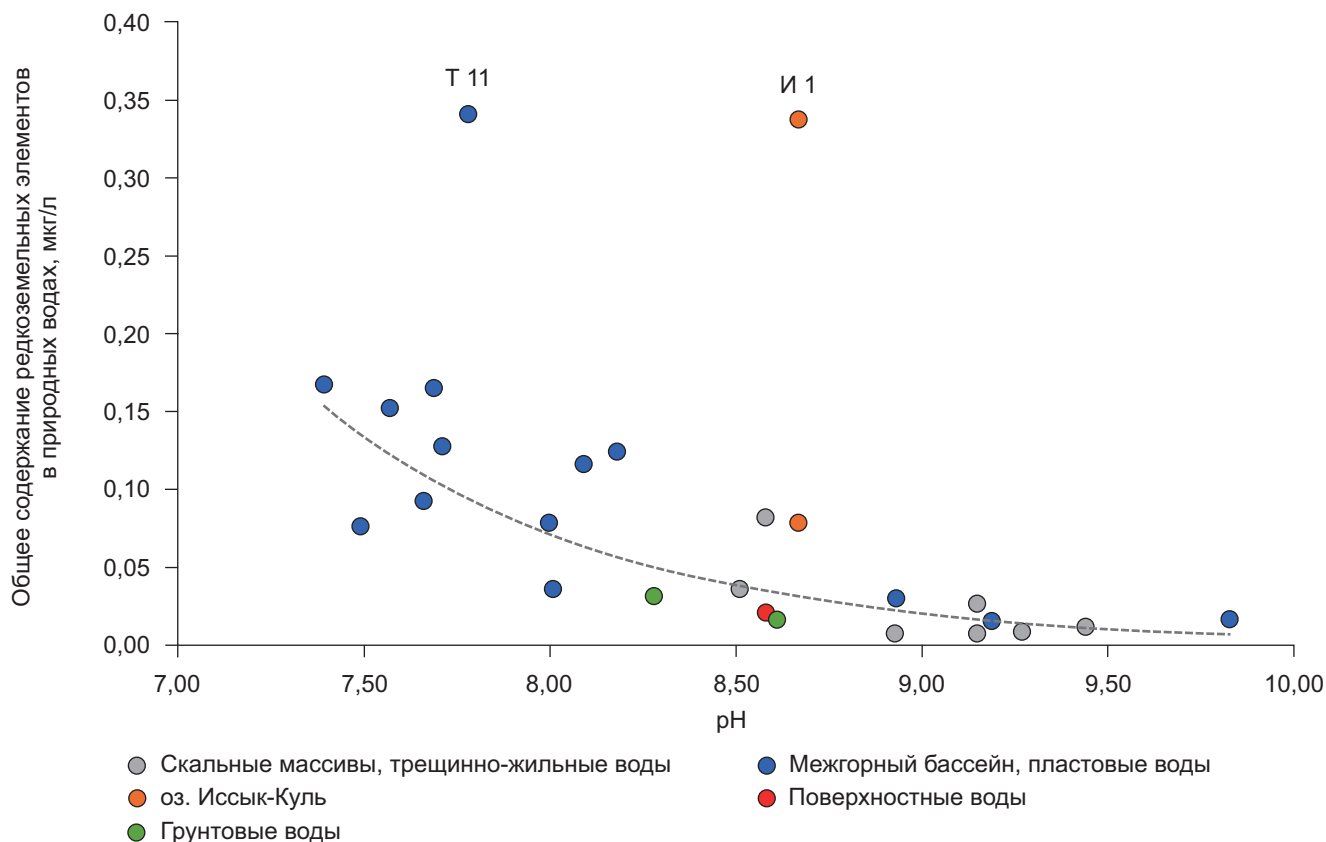


Рис. 5. Соотношение общего количества редкоземельных элементов в природных водах северного Иссык-Куля и pH водной среды

водах преобладающей формой миграции является  $Al(OH)_4^-$ .

Миграционные формы элементов главным образом регулируются составом анионной части термоминеральных вод. По этому показателю воды можно разделить на несколько групп. На рис. 6 и 7 представлены диаграммы, иллюстрирующие связь анионного и катионного состава термоминеральных вод с водными комплексами элементов. В пресных хлоридно-гидрокарбонатных и гидрокарбонатно-хлоридных натриевых и натриево-кальциевых водах (водопункты  $T_{16}$ ,  $T_{10}$ ,  $T_{13}$ ,  $T_{20}$ ,  $T_{22}$ ,  $T_{23}$ ,  $T_{24}$ ,  $T_{26}$ ,  $T_3$ ) комплексные соединения рассматриваемых элементов практически отсутствуют либо составляют незначительное количество (0,03–14,6%).

В высокоминерализованных хлоридных кальциево-натриевых и натриевых водах образуются

комплексные соединения  $MeCl$  и  $MeSO_4$ , на их долю приходится 2,71–34,41% и 0,45–14,99% соответственно ( $T_{18}$ ,  $T_{11}$ ,  $T_5$ ,  $T_{15}$ ,  $T_8$ ,  $T_6$ ,  $T_{14}$ ).

В пресных сульфатно-хлоридных кальциево-натриевых ( $T_{21}$ ), а также маломинерализованных сульфатно-хлоридных и гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридных натриевых и кальциево-натриевых водах ( $T_{27}$ ,  $T_{19}$ ); пресных гидрокарбонатно-хлоридно-сульфатных натриевых водах ( $T_7$ ,  $T_4$ ) и высокоминерализованных хлоридно-сульфатных натриевых водах ( $I_1$ ) комплексные соединения представлены в основном в форме  $MeSO_4$ .

В случае элементов с переходной валентностью на формы водной миграции значительное влияние оказывают Eh–pH условия системы. На рис. 8 для нескольких компонентов продемонстрирована связь форм миграции элементов с окислительно-восста-

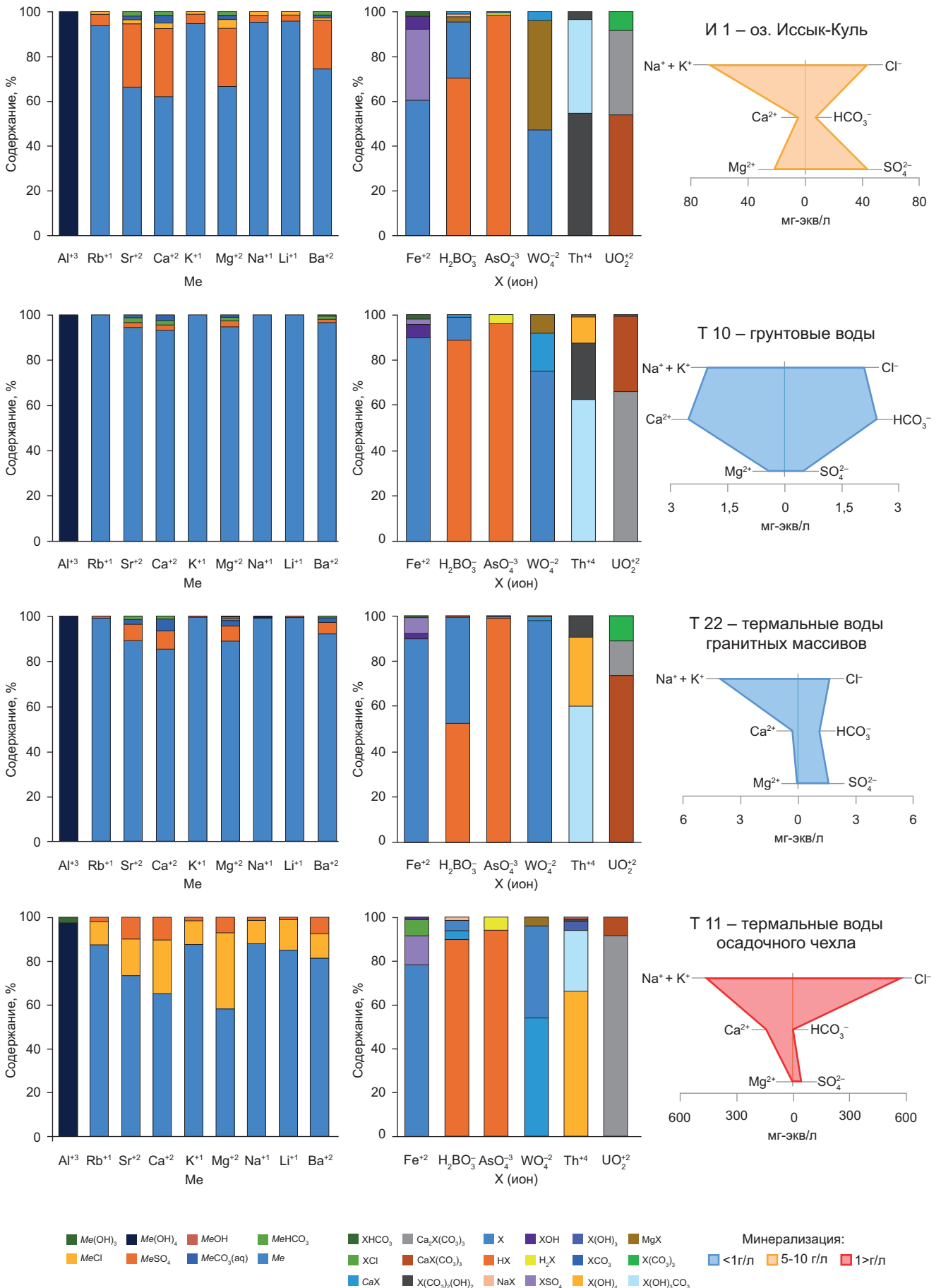


Рис. 6. Корреляция форм водной миграции отдельных компонентов с минерализацией и химическим составом природных вод Иссык-Кульского артезианского бассейна



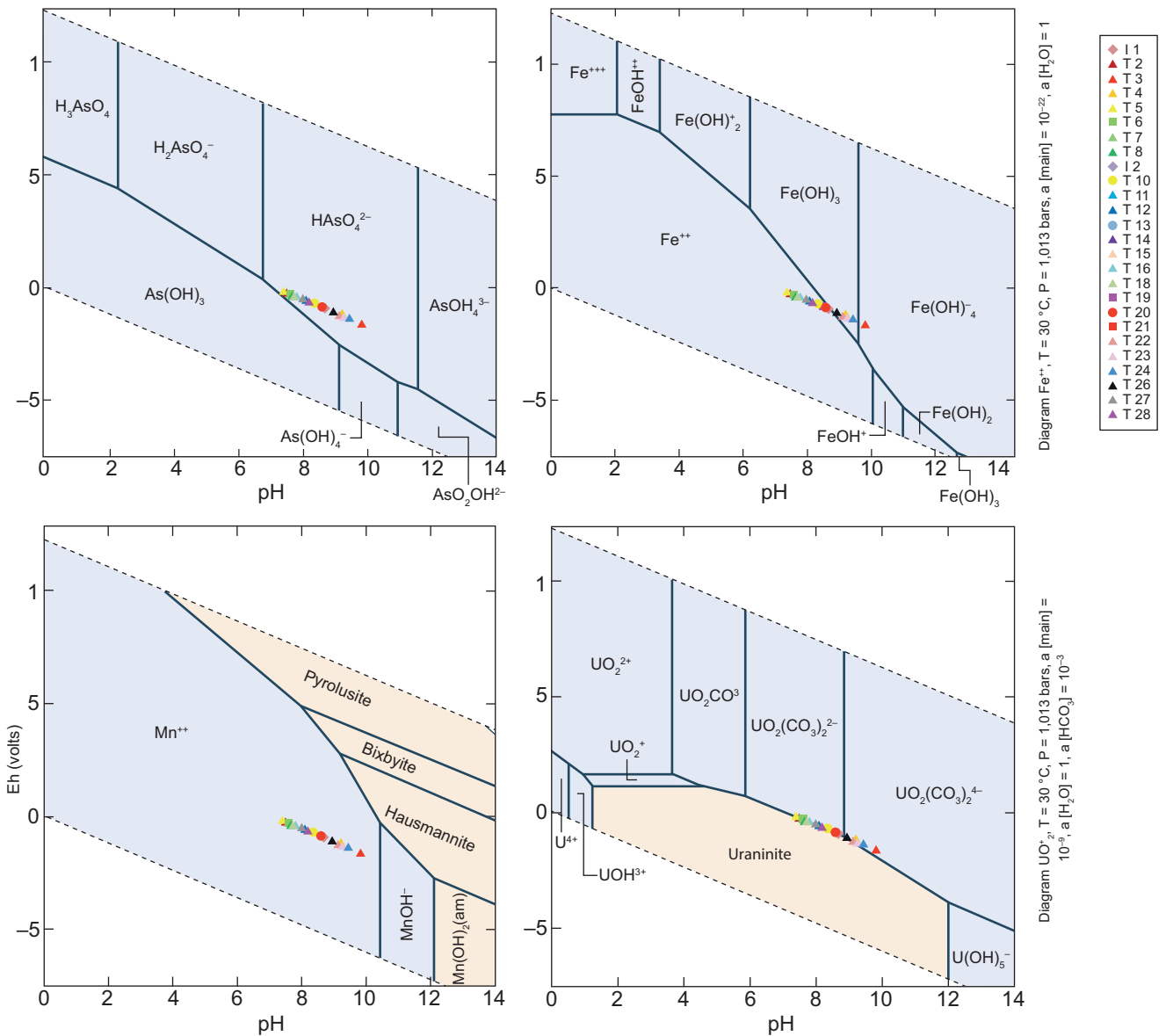


Рис. 8. Eh-pH диаграммы стабильности комплексов водной миграции мышьяка, железа, марганца и урана в природных водах Иссык-Кульского горного района

новительными условиями. Преобладающей формой миграции урана во всех пробах, за исключением T<sub>6</sub>, являются комплексные соединения CaUO<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub><sup>2-</sup> и Ca<sub>2</sub>UO<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>. Если содержания кальция в растворе сильно уменьшаются до 2–5%-экв., комплексы с кальцием исчезают, и начинают преобладать уранил-карбонатные комплексы UO<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>4</sub><sup>4-</sup>.

Основными миграционными формами тория в рассматриваемых пробах являются Th(OH)<sub>4</sub>, Th(OH)<sub>3</sub>CO<sub>3</sub><sup>-</sup> и Th(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub><sup>2-</sup>. С увеличением pH и уменьшением минерализации доля карбонатных форм увеличивается.

В большинстве проб преобладающей формой миграции вольфрама является WO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. При увеличении содержания кальция увеличивается доля CaWO<sub>4</sub> (до 54% в пробе T<sub>18</sub>). Если в растворе присутствует значительное количество магния, то начинает образовываться комплекс MgWO<sub>4</sub>.

Мышьяк в изучаемых водах представлен в основном в двух формах: HAsO<sub>4</sub><sup>2-</sup> и H<sub>2</sub>AsO<sub>4</sub><sup>-</sup>. Преобладающей формой является HAsO<sub>4</sub><sup>2-</sup> и ее количество не зависит от гидродинамических условий. В случае же уменьшения pH вод ниже 7,0 начинает проявляться H<sub>2</sub>AsO<sub>4</sub><sup>-</sup> (рис. 8).

Основными формами миграции бора в рассматриваемых водах являются H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> и H<sub>2</sub>BO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Доля H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> увеличивается при уменьшении pH. В высокоминерализованных водах присутствует небольшая доля CaH<sub>2</sub>BO<sub>3</sub><sup>+</sup>.

Преобладающей миграционной формой железа во всех пробах, за исключением T<sub>3</sub>, является простой ион Fe<sup>2+</sup>. С увеличением величины pH увеличивается доля формы Fe(OH)<sup>+</sup>, в пробе T<sub>3</sub> при pH = 9,83 доля Fe(OH)<sup>+</sup> достигает 62%. Также при увеличении минерализации и содержания SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> появляется форма FeSO<sub>4</sub>. В высокоминерализованных хлоридных во-

дах присутствует небольшая доля  $\text{FeCl}^+$ . В пресных и маломинерализованных водах, имеющих  $\text{HCO}_3^-$  в макрокомпонентном составе, в небольших количествах появляется комплексное соединение  $\text{FeHCO}_3^+$ .

При рассмотрении редкоземельных элементов опробованные воды так же можно разделить на несколько групп. При этом скандий во всех пробах представлен в виде гидроксидов, преимущественно  $\text{Sc}(\text{OH})_4^-$ .

К первой группе отнесены пресные и слабоминерализованные воды, для них характерной формой миграции редкоземельных элементов являются карбонатные соединения  $\text{MeCO}_3^+$  и  $\text{Me}(\text{CO}_3)^{2-}$ . Доля  $\text{Me}(\text{CO}_3)^{2-}$  преобладает и увеличивается от лантана до лютеция.

Вторая группа включает в себя среднеминерализованные воды, в которых редкоземельные элементы присутствуют в виде различных комплексных соединений —  $\text{MeCO}_3^+$ ,  $\text{Me}(\text{CO}_3)^{2-}$  и  $\text{MeSO}_4^+$ , а также простых ионов  $\text{Me}^{3+}$ . При уменьшении pH и содержания  $\text{HCO}_3^-$  в воде, доля карбонатных комплексов заметно уменьшается ( $T_5, T_6, T_{11}$ ).

**Коэффициент водной миграции** позволяет представить особенности миграции отдельных химических элементов в различных водоносных горизонтах и зонах изучаемого района, оценить степень подвижности элементов. Чем выше коэффициент водной миграции (то есть, чем интенсивнее его водная миграция), тем сильнее химический элемент способен выщелачиваться из вмещающих отложений. Группировка элементов по интенсивности водной миграции позволяет построить геохимическую модель и выделить круг элементов, которые интенсивно выносятся за пределы водовмещающих толщ, обедняя их. На интенсивность водной миграции химического элемента влияет значительное количество параметров: его содержание в литосфере (кларк), индивидуальные свойства элемента, условия движения воды, минерализация, температура и т.д. [Крайнов, Швец, 1992]. Для оценки интенсивности миграции компонентов в термоминеральных водах изучаемой площади рассчитан коэффициент водной миграции  $K_x$  для макро- и микрокомпонентов по

отношению к их содержанию в гранитных породах и в алевролитах.

Таблица 5 представляет результаты расчета коэффициентов водной миграции отдельных компонентов в зависимости от гидрогеологических условий циркуляции, состава водной толщи и минерализации воды.

Анализ данных показывает, что миграция компонента достаточно сильно варьирует в зависимости от условий циркуляции вод. Например, в скальных массивах Sr является сильным мигрантом, а в осадочной толще он мигрирует слабее и его миграционная способность средняя. Похожая картина характерна и для Cs. Практически во всех условиях сильными или очень сильными мигрантами ( $K_x > 1$ ) являются основные катионы (Ca, Na, Mg) и микроэлементы Mo, Sr, Mn и Cs. Наиболее низкая интенсивность водной миграции свойственна таким микроэлементам как Al, Th, Fe, Co, Cr, Rb, Ti. В термальных водах гранитных массивов сильная и очень сильная интенсивность миграции ( $K_x > 1$ ) характерна для таких элементов как Mo, Mn, Na, Sr, Ca, средняя (0,1–1) для Rb, K, Mg. Для термальных вод осадочного чехла наблюдается такая же закономерность, исключением являются Rb и Mg, коэффициент водной миграции которых становится меньше 0,1. В холодных подземных водах осадочного чехла по сравнению с термальными увеличивается коэффициент водной миграции Sr, и он переходит в группу элементов с очень сильной интенсивностью миграции, а интенсивность миграции Rb увеличивается до средней.

На рис. 9 отражены средние значения для коэффициентов водной миграции для каждой группы опробованных вод, а также минимальные и максимальные значения рассматриваемых показателей.

**Заключение.** Таким образом, проведенные исследования показывают, что неравномерность заполнения осадками межгорной впадины Иссык-Куль приводит к спорадическому распространению минеральных вод с различной минерализацией и химическим составом. В палеогеновых осадках химический состав вод наследует тип водовмещающей

Таблица 5

Коэффициент водной миграции отдельных компонентов в водах различных гидрогеологических условий циркуляции

Интенсивность миграции	$K_x$ границы	Скальные массивы		Осадочная толща				
		Минерализация термоминеральных вод, г/л						
		<1	1–2	<1	1–2	2–5	5–10	>10
Очень сильная	>10	Mo, Cs, Na	Mo, Mn, Na	Mo, Na	Mo, Na	Mo, Mn, Na	Mo, Na	Mo, Na, Mn, Sr
Сильная	1–10	Sr, Mn, Ca	Sr	–	Mn	Cs	Sr, Mn, Ca	Ca
Средняя	0,1–1	Rb, K, Mg	Ca, Ba	Sr, Mn, Si, Ca, K, U	Sr, Ca, U	Sr, Rb, K, Ca, U	–	–
Слабая	<0,1	Si, U, Ba, Hf, Lu, Al, Ti, La, Th	K, Mg, Cs, Si, Rb, U, Hf, Th, La, Lu, Al, Ti	Ba, Mg, Cs, Rb, Al, Lu, Hf, Th, La, Ti	K, Ba, Si, Mg, Cs, Rb, Al, Hf, Lu, Ti, La, Th	Ba, Si, Mg, Hf, Lu, Al, La, Ti, Th	K, Ba, Rb, Cs, Si, Mg, U, Hf, Lu, Al, La, Th, Ti	K, Mg, Cs, Ba, Rb, Si, U, Lu, Hf, La, Al, Th, Ti

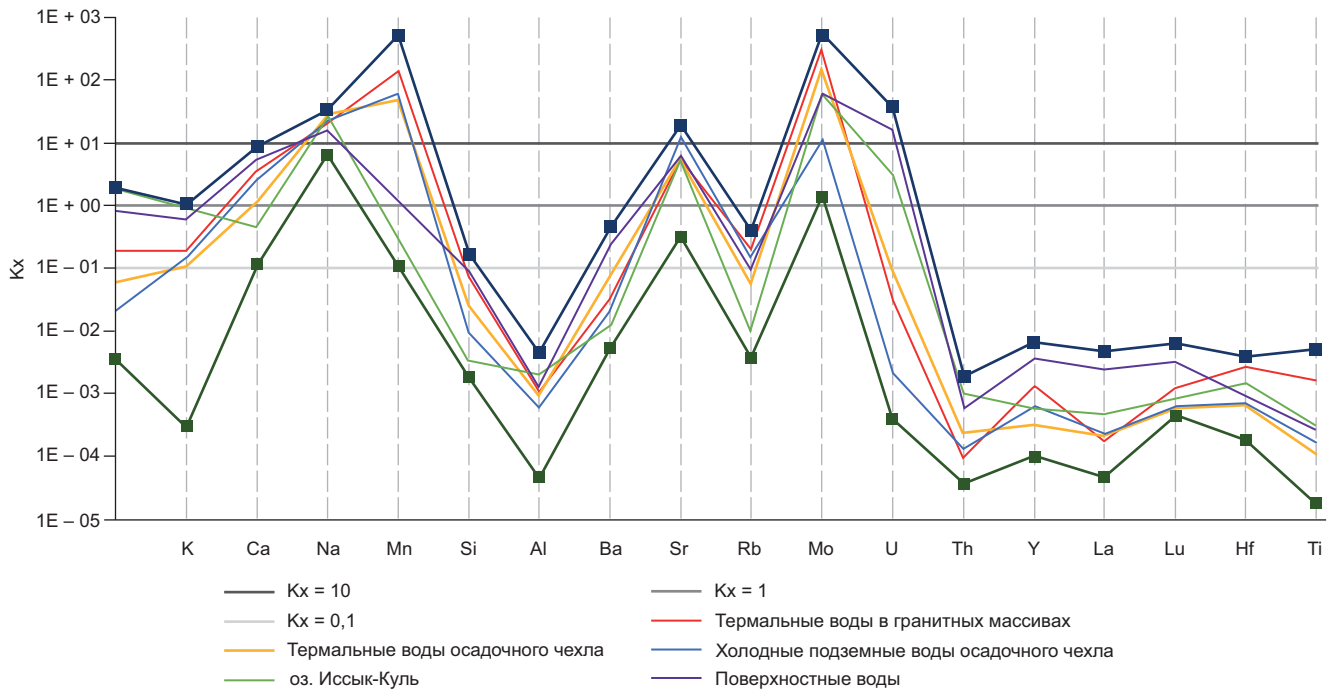


Рис. 9. Коэффициент водной миграции в природных водах Иссык-Кульской горной впадины

толщи. В средней и верхней частях разреза формируются солоноватые сульфатно-хлоридные/хлоридно-сульфатные воды кальциево-натриевого/натриевого состава. В нижней части разреза на глубине 1–2 км водовмещающая толща имеет пониженную проницаемость, что приводит к образованию застойного режима. В условиях повышенного теплового потока (высокой теплопроводности водовмещающих толщ) формируются термальные высокоминерализованные (солёные) воды хлоридно-натриевого состава. Присутствие в разрезе прослоев гипса, поваренной соли, мирабилита, глинистых пород, конгломератов, песчаников и гравелитов обеспечивает повышенные содержания В, Sr, Ba, Li, Fe, Mn, В, Мо и U в минеральных водах. Часто выявляются вертикальные перетоки солёных вод в верхние более пресные слои. Низкоминерализованные термальные воды скальных массивов содержат повышенные концентрации F, Li, Rb, W и Sc.

Минимальные концентрации РЗЭ выявлены в водах скальных массивов, что обусловлено высоким значением pH термоминеральных вод. Сопоставление суммарного содержания РЗЭ и минерализации вод показывает неплохую корреляционную связь.

Наблюдаемые различия в ΣРЗЭ в изучаемых термоминеральных водах обусловлены типом водовмещающих толщ, а также скоростью движения подземных вод и временем их циркуляции. Содержания скандия в водах достаточно хорошо коррелируются с концентрациями РЗЭ: в пробах, обогащенных РЗЭ, фиксируется повышенное содержание Sc.

Формы водной миграции компонентов зависят от анионной части раствора, его температуры и pH–Еh условий. Гидродинамическая обстановка не влияет на соотношение водных комплексов. Однако значение коэффициента миграции в значительной степени определяется типом водовмещающей толщи и гидродинамическими условиями циркуляции вод, и в меньшей степени зависит от температуры водной среды и ее минерализации.

**Финансирование.** Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 23-27-00119 «Генезис и условия циркуляции термальных вод кристаллических массивов горноскладчатых областей»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гидрогеология СССР. Т. XL. Киргизская ССР / Гл. ред. А.В. Сидоренко. М.: Недра, 1971. 487 с.  
 Еловский Е.В. Математическое устранение спектральных помех при прямом определении редкоземельных элементов в природных водах методом квадрупольной масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой // Масс-спектрометрия. 2015. Т. 12, № 2. С. 107–116.  
 Жуков Ю.В., Захаров И.Л., Березанский А.В., Израилева Р.М. Геологическая карта Кыргызской республики. Масштаб 1 : 500 000 / Гл. ред. Б.Т. Турсунгазиев, О.В. Петров. СПб.: Картогр. ф-ка ВСЕГЕИ, 2008.

Катаева Н.И. Подземные минеральные воды Киргизской ССР / Н.И. Катаева, З.И. Мельникова, Р.Д. Барсуцкая и др.; М-во здравоохранения Кирг. ССР. Науч.-исслед. ин-т курортологии и физиотерапии. Фрунзе: Кыргызстан, 1969. 142 с.  
 Кендирбаева Д.Ж. Подземные воды межгорных впадин — основа водообеспеченности Кыргызстана для устойчивого развития // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа: Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. М.: Институт истории

естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, 2023. С. 513–520. DOI 10.26200/GSTOU.2023.87.54.067.

*Крайнов С.Р., Швец В.М.* Гидрогеохимия: Учебник для вузов. 1992. М.: Недра, 463 с.

*Мандычев А.Н.* Подземные воды Иссык-Кульского бассейна // Озеро Иссык-Куль: природные условия. Научные серии НАТО: IV. Земля и экологические науки. Т. 13. 2002. С. 71–76.

*Мандычев А.Н.* Роль гидрогеологической системы в Иссык-Кульском водном бассейне. <https://geohydro.narod.ru/stat16A.htm>.

*Матыченков В.Е., Иманкулов Б.И.* Минеральные воды Киргизии. Фрунзе: Илим, 1987. 251 с.

*Перельман А.И.* Геохимия элементов в зоне гипергенеза / А.И. Перельман. М.: Недра, 1972.

*Трифонов В.Г., Зеленин Е.А., Соколов С.Ю., Бачманов Д.М.* Активная тектоника Центральной Азии // Геотектоника. 2021. № 3. С. 60–77.

*Харитоновна Н.А., Барановская Е.И., Челноков Г.А.* и др. Геохимия природных вод Киргизской части Тянь-Шаня // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Мат-лы V Всероссийской научной конференции имени проф. С.Л. Шварцева. Томск, 2023. С. 327–330.

*Chelnokov G., Lavrushin V., Bragin I., et al.* Geochemistry of Thermal and Cold Mineral Water and Gases of the Tien Shan and the Pamir // Water. 2022. V. 14, 838. <https://doi.org/10.3390/w14060838>.

*Gustafsson J.P.* Visual MINTEQ 3.1 user guide. 2019. 73 p. Официальный сайт программного комплекса The Geochemist's Workbench (GWB). <https://www.gwb.com>.

Статья поступила в редакцию 23.03.2024,  
одобрена после рецензирования 03.06.2024,  
принята к публикации 18.08.2024