

Научные статьи

УДК 551.23/23+553.78

DOI: 10.31431/1816-5524-2020-3-47-5-24

КИРЕУНСКИЕ И ДВУХЮРТОЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ СРЕДИННОГО ХРЕБТА КАМЧАТКИ: ГЕОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И ГЕОТЕРМИЯ

© 2020 Ю.А. Таран^{1,2}, Л.М. Юрова¹, В.Л. Леонов¹, Т.П. Кирсанова¹, В.Е. Кириченко³

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006;
e-mail: yuri.taran@gmail.com

²Институт геофизики Национального университета Мексики, Койокан, Мехико, Мексика, 04510

³Камчатский филиал Тихоокеанского института географии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006

Киреунские и Двухюрточные термальные источники, расположенные в 15 км друг от друга в предгорьях Срединного хребта Камчатки, примерно на широте Ключевской группы вулканов, уже много лет были объектом исследований в связи с их использованием в геотермальных и бальнеологических целях. В статье обобщаются литературные данные и собственные данные авторов по гидрогеологии, геохимии и геотермальном потенциале источников, основанные на геологическом картировании, химических и изотопных анализах и измерении расходов термальных вод. Большой набор изотопных данных, включающий анализы стабильных изотопов и трития в водах, а также $^3\text{He}/^4\text{He}$ и N_2/Ar в газах источников, позволил оценить особенности движения термальных растворов на глубине. Предлагается концептуальная модель этого геотермального района, объясняющая сходство и различие геохимических и геотермальных характеристик этих двух гидротермальных систем.

Ключевые слова: Киреунские и Двухюрточные термальные источники, Камчатка, стабильные изотопы, тритий.

ВВЕДЕНИЕ

Киреунские и Двухюрточные горячие источники, разгружающиеся в предгорьях Срединного хребта Камчатки на восточных склонах вулканического массива Алней-Чашаконджа, уже давно были объектами изучения нескольких групп исследователей^{1,2,3,4,5}. Однако данных по гидрохи-

мии и другим параметрам источников, опубликованных в доступной литературе, крайне мало. Киреунские источники, как «Крестовские», упоминаются в статье П.Т. Новограбленова (1931). Короткое сообщение о Киреунских источниках (Кирсанова, 1971) опубликовано в материалах одного из вулканологических совещаний. Ограниченные сведения о Двухюрточных источниках можно найти в работе Н.А. Озеровой и др. (1970).

п-ва Камчатка (бассейн верхнего и среднего течения р. Быстрая). Ф. КППС. 1955. 114 с.

⁴Зимин В.М. Отчет о гидрогеологической съемке масштаба 1:200 000 с комплексом геолого-съёмочных работ, проведенной Авалконской

⁵Диламян В.В., Декусар З.Б. Отчет о работе Паужетского гидрогеологического отряда 1962-1963 гг. (бороносность минеральных вод Камчатки). Ф. КПГО. 1963. 97 с. партией на листе N57-XV в 1973-1976 гг. Ф. КПГО. 1977. 250 с.

¹Иванов В.В. Минеральные воды Камчатки (отчет Камчатской комплексной экспедиции 1951 г.). Ф. КППС. 1952. 165 с.

²Жегалов Ю.В. Геологическое строение центральной части Срединного Камчатского хребта (Отчет о геологической съемке масштаба 1:1 000 000, проведенной летом 1955 года Киреунской партией ДВГУ). Ф. КППС. 1956. 218 с.

³Стырикович Б.В. Отчет о комплексной геолого-гидрогеологической съемке масштаба 1:500 000, проведенной в 1954 году в центральной части

Гораздо больше сведений имеется о геологии и рудопроявлениях района, в результате работ сотрудников Института вулканологии (Василевский и др. 1974; Василевский и др. 1977; Карпов, 1988; Огородов, 1972; Стефанов, Широкий, 1980; Шанцер, Краевая, 1980). Гидрогеохимия обеих групп источников детально изучалась в 1987–1988 гг. Л.М. Юровой и Ю.А. Тараном. В то же время группой В.Л. Леонова было проведено геологическое картирование этого геотермального района. Гидрохимические исследования в этом районе проводились также в 1989–1993 гг. В.Е. Кириченко в рамках работ Паратунской гидрогеологической экспедиции ПГО «Камчатгеология».

В настоящей статье обобщаются и используются для построения модели все имеющиеся у авторов данные по Киреунским и Двухюрточным источникам. Эти данные включают: химические составы воды многочисленных групп источников; изотопный состав воды (δD , $\delta^{18}O$) и растворенного сульфата ($\delta^{34}S-SO_4$, $\delta^{18}O-SO_4$); содержание трития в водах Киреунских источников; газовый состав источников; изотопный состав углерода CO_2 ($\delta^{13}C-CO_2$) и гелия ($^3He/^4He$) в свободных газах. Кроме того, получены расходы и химический состав дренирующих ручьев основных групп источников. Уточнены также геолого-структурная схема района и элементы локальной тектоники.

Результатом работы являются оценки глубинных температур с использованием гидро- и газохимических показателей и изотопного состава кислорода растворенного сульфата, а также предположения об источниках некоторых компонентов в составе термальных вод. На основании измеренных расходов оценены естественный и глубинный вынос тепла. По химическому и изотопному составу воды и содержанию в ней трития делаются предположения о движении термальных вод на глубине и зонах водного питания. Геолого-структурные построения помогли предложить концептуальную модель геотермального района. Обсуждается также ряд нерешенных проблем, требующих дополнительных исследований.

Эта работа посвящена памяти Владимира Леонидовича Леонова (<http://www.kscnet.ru/ivs/memory/leonov/>) — известного геолога и вулканолога, внесшего неоценимый вклад в изучение геологии геотермальных систем Камчатки (рис. 1). Статья написана к 70-летию со дня его рождения. В ней используются геолого-структурные построения, основанные на полевых исследованиях В.Л. Леонова, проведенных в 1988 г.

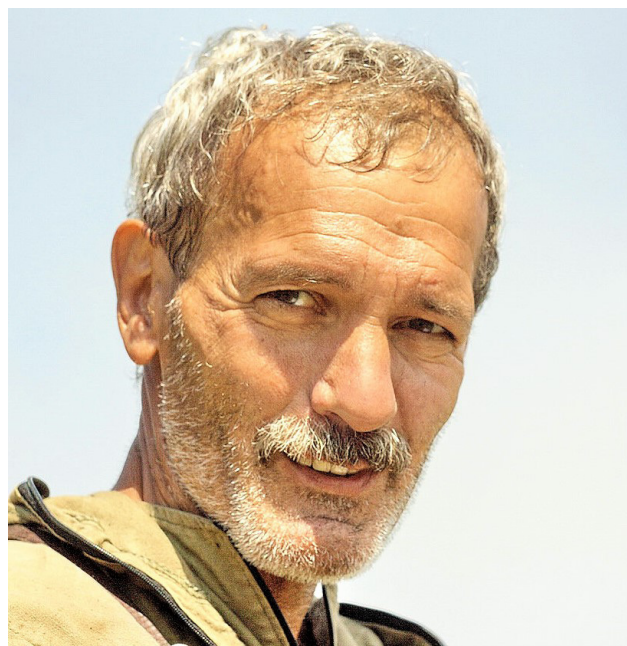


Рис. 1. Владимир Леонидович Леонов (13.07.1950 – 2.10.2016)

Fig. 1. Vladimir Leonidovich Leonov (13.07.1950 – 2.10.2016)

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПОЗИЦИИ КИРЕУНСКО-ДВУХЮРТОЧНОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО РАЙОНА

Киреунские и Двухюрточные источники приурочены к грабенам восточного склона и северо-восточного продолжения крупной вулканической постройки — массива Алней-Чашаконджа. Геологическое строение этого массива кратко описано в работах Н.В. Огородова с соавторами (1972) и Ю.М. Стефанова и Б.И. Широкого (1980). Южная часть массива изучалась также в работе (Шанцер, Краевая, 1980). Карта-схема района с местоположениями известных групп источников приведена на рис. 2. Наиболее нижние части геологического разреза датируются ранним плиоценом. Это преимущественно осадочные породы (туфоалевролиты и туфопесчаники), среди которых встречаются потоки лав базальтового состава. Характерной особенностью лавового разреза является наличие среди них мегаплагиофировых разностей. Последние образуют обычно мощные (до 50 м) потоки или серии потоков и имеют возраст около 4 млн лет (Шанцер, Краевая, 1980). Если рассматривать эти базальты как маркирующий горизонт, то можно говорить о постепенном погружении его в северо-восточном направлении. Лавы базальтового состава (нижний плейстоцен) локализованы по периферии района (Огородов и др., 1972). Вулканиды средне-четвертичного возраста слагают основание массива

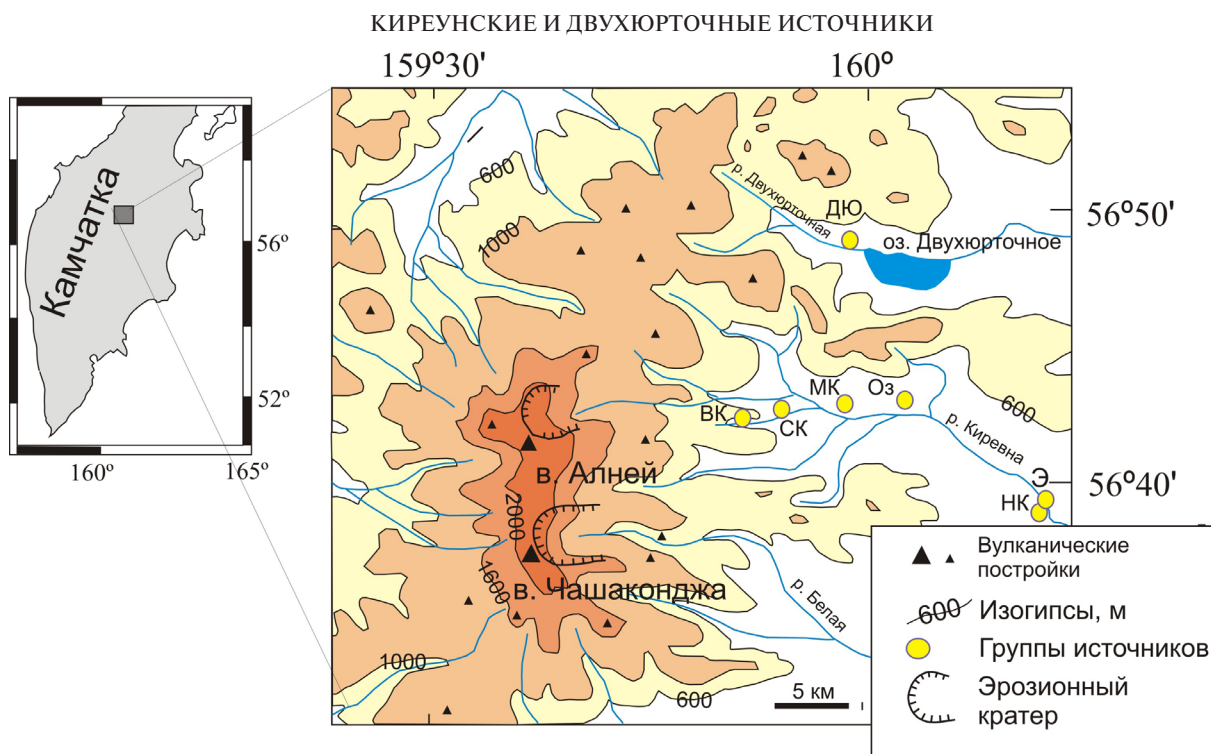


Рис. 2. Карта-схема Киреунско-Двухюрточного геотермального района. Источники: ВК — Верхне-Киреунские; СК — Средне-Киреунские; МК — Малые Киреунские; Оз — Озерные; НК — Нижне-Киреунские; ДЮ — Двухюрточные; Э — Эпепка.

Fig. 2. Schematic map of the Kireunsky-Dvukhyurtochny geothermal area. Springs: ВК — Upper Kireunsky; СК — Middle Kireunsky; МК — Little Kireunsky; Оз — Ozernye; НК — Lower Kireunsky; ДЮ — Dvukhyurtochny; Э — Eperka.

Алней-Чашаконджа. По составу они отвечают андезибазальтам и андезитам. Положение центров вулканической деятельности этого возраста нам восстановить не удалось. Особенно мощные наслаения лав этого комплекса отмечены в северной части массива, к востоку от вулкана Алней. Наиболее молодые вулканические постройки в районе представлены шлаковыми конусами и связанными с ними лавовыми потоками. Среди этих образований наиболее молодые лавовые потоки: Киреунский и на реке Белой, датируются примерно в 2.5 тыс. лет (Певзнер, 2015).

Киреунские термопроявления расположены у северо-восточного подножия массива Алней-Чашаконджа в 15–18 км от его вершинного гребня. На поверхности их расположение контролируют разломы и трещины широтного простирания, ограничивающие Киреунский грабен (рис. 3). Центральная часть грабена в районе источников погружена относительно его бортов на 500 м (амплитуда оценена по положению в разрезах маркирующего пласта мегаплагиофировых лав). В привершинной части массива, в верховьях рек Киревна и Белая, современные термопроявления отсутствуют. В то же время здесь в междуречье Киревны и Белой расположено обширное поле гидротермально-измененных пород (рис. 3) (Стефанов, Широкий, 1980).

На геолого-структурной схеме района Киреунских и Двухюрточных термальных источников (рис. 3) наиболее ярко проявлены разломы и разрывные нарушения северо-восточного простирания (СВ 50°), которые образуют ряд протяженных зон, расположенных в 7–9 км друг от друга. Эти разломы секут позднеплейстоценовые, а иногда и голоценовые постройки, что позволяет рассматривать их как наиболее молодые. В то же время новейшие вулканические образования в районе формируют пояс северо-северо-восточного простирания (ССВ 22°), секущий по отношению к названным зонам разломов.

Все термопроявления в районе расположены в грабенах — наиболее глубоких врезках в восточные склоны Срединного хребта. В пределах грабенов термопроявления контролируются упомянутыми разломами и разрывными нарушениями северо-восточного простирания. Можно выделить четыре зоны этих разломов и нарушений; по крайней мере, с тремя из них связана своя группа термальных источников (рис. 3). Приведенные выводы фиксируют лишь поверхностные связи. В то же время, как мы знаем на примере Восточной Камчатки, на расположение гидротермальных систем основополагающую роль оказывают глубинные термо- и магмовыводящие разломы, которые

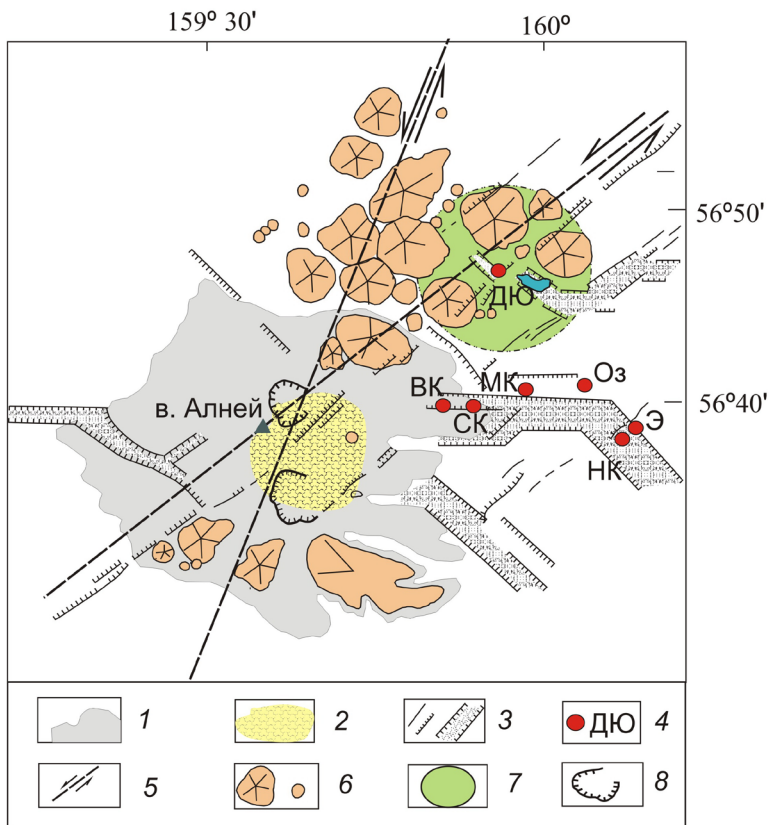


Рис. 3. Геолого-структурная схема района Киреунской и Двухюрточной гидротермальных систем: 1 — лаво-пирокластический комплекс массива Алней-Чашаконджа (средний-верхний плейстоцен); 2 — Зоны гидротермально измененных пород; 3 — разрывные нарушения, сбросы, грабены; 4 — Термальные источники (рис. 2); 5 — разломы; 6 — Вулканические постройки и шлаковые конусы; 7 — Двухюрточная кольцевая структура (по В.М. Зимину⁴); 8 — эрозионные кратеры вулканов Алней и Чашаконджа.

Fig. 3. Schematic geologic-structural map of the Kireunsky-Dvukhyurtchny geothermal area: 1 — Lava-pyroclastic complex of the Alney-Chashakondzha massive (Middle-Upper Pleistocene); 2 — Zones of hydrothermally altered rocks; 3 — Fractures, faults, grabens; 4 — Thermal springs (see Fig. 2); 5 — Faults; 6 — Volcanic edifices, cinder cones; 7 — Dvukhyurtchny ring structure; 8 — Erosion craters of Alney and Chashakondzha volcanoes.

на поверхности проявлены не всегда отчетливо (Леонов, 1989)

Приведенные геолого-структурные данные не позволяют говорить однозначно о связи Киреунской и Двухюрточной гидротермальных систем с массивом Алней-Чашаконджа. Однако, подобно тому, как термопроявления Большесемьячского центра и Мутновского геотермального района расположены в стороне от основных зон разгрузки геотермального пара (Леонов, 1989), т.е. от поверхностных проявлений кипения термальной воды на глубине, термопроявления на реках Киревне и Двухюрточной расположены в стороне от массива Алней-Чашаконджа и основных зон гидротермальных изменений. Возможно, что здесь мы также имеем дело с глубинными термовыводящими зонами, которые не совпадают с поясом новейшего вулканизма, но связаны с появлением в позднем плейстоцене фазы кислого вулканизма и кальдерообразования в пределах вулканотектонической структуры Алней-Чашаконджа (Василевский и др., 1974).

ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРМОПРЯВЛЕНИЙ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО РАЙОНА

Сведения об отдельных группах Киреунских и Двухюрточных приведены в табл. 1.

Киреунские источники. Район разгрузки Киреунских источников представляет собой

плато, прорезанное рекой Киревна и ее притоками, берущими начало на склонах вулкана Алней (рис.2). Термальная площадка *Верхней группы* Киреунских источников расположена в тальвеге каньонообразной долины ручья Термального, на абсолютной высоте около 450 м (табл. 1). По состоянию на 1994 г. здесь насчитывалось более 200 выходов термальных вод, около 10 из которых — кипящие, с температурой 98°C. При этом некоторые из кипящих источников представляют собой малодобитные котлы, а некоторые имеют заметный расход. Многие источники газируют. Общий расход термальных вод с площадки Верхней группы (в пересчете на максимальное содержание хлорид-иона), рассчитанный по расходу дренирующей площадку Термального ручья и содержанию хлорида в нем, около 40 л/с.

Термальная площадка *Средней группы*, расположенная в 2 км от Верхней группы на абсолютной высоте около 370 м, представлена малодобитными источниками с максимальной температурой на выходе 77°C. В 1989–1992 гг. здесь насчитывалось около 70 выходов с максимальным расходом до 1.2 л/с. Источники не газируют. Общая разгрузка с термальной площадки составляет 2 л/с. Обе группы источников — Верхняя и Средняя — характеризуются отложениями гейзерита, что может свидетельствовать о более мощной деятельности источников в прошлом.

КИРЕУНСКИЕ И ДВУХЮРТОЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ

Таблица 1. Координаты, абсолютная высота, максимальные температуры и максимальное содержание хлорид-иона источников Киреунско-Двухюрточного геотермального района. Для Верхних и Средних Киреунских дается среднее местоположение.

Table 1. Coordinates, altitudes, maximal temperatures, and maximal chloride contents in the springs of the Kirevna-Dvukhyurtochny geothermal area. A mean location is shown for the Upper and Middle Kireunsky springs.

	Широта	Долгота	Абс. высота м	t°Смакс	Cl макс. мг/л
Киреунские источники					
Верхние	56°43.07'	159°52.00'	485	98	740
Средние	56°43.31'	159°54.34'	370	80	709
Малые					
Западные	56°44.05'	159°57.83'	301	50	388
Центральные	56°43.84'	159°59.23'	280	37	377
Северные	56°44.12'	159°59.50'	288	60	420
Восточные	56°43.83'	160°00.34'	267	23	226
Озерные					
Западные	56°44.04'	160°02.34'	266	42	516
Центральные	56°44.10'	160°02.44'	272	36	497
Восточные	56°49.41'	160°04.53'	268	31	271
Нижние	56°41.48'	160°07.93'	211	70	829
Эпепка	56°42.00'	160°08.48'	222	59	721
Двухюрточные источники					
Центральные	56°50.09'	159°59.89'	277	78	615
Южные	56°49.80'	159°59.03'	290	77	630
Западные	56°50.17'	159°59.58'	312	58	620
Восточные	56°49.41'	160°01.81'	270	47	140

Малые Киреунские источники (или *Крокодилы слезы*, по (Кирсанова, 1971)) расположены на достаточно обширной площади на левом берегу р. Киревны. В 1969 г. Т.П. Кирсановой (1971) был опробован один выход с температурой 36°С. В 1988 г. нами отобраны еще три пробы (табл. 2). Позднее в этом районе были выделены еще три группы источников. Западная группа обнаружена в 1989 г., а Северная и Восточная группы в 1990 г. Максимальная температура источников Западной группы 49°С, Северной — до 60°С и Восточной — 23°С (табл. 1). Суммарный дебит Малых Киреунских источников с концентрацией хлорид-иона 300 мг/л составляет около 10 л/с.

Озерные источники были впервые обнаружены и опробованы В.Е. Кириченко в 1989 г. Термальные выходы образуют три группы у подножья левого борта долины р. Киревна на протяжении до 2 км. Западная группа расположена на абсолютных отметках 270 м. Здесь разгружается источник с дебитом 0.3 л/с и температурой 41.5°С. Источник, слабо газифицирующийся, с запахом сероводорода. В 100 м восточнее находится Центральная группа. Здесь разгружаются четыре источника с

температурами 33–35°С и суммарным расходом 0.5 л/с. Источники слабо газифицируются. Восточная группа находится в четырех км к востоку-юго-востоку от Центральной группы на абсолютной высоте 275 м, в долине небольшого ручья. Выходы с температурой от 21 до 31°С и расходами до 0.4 л/с в результате дают суммарный дебит воды с 250 мг/л хлорид-иона около 8 л/с.

Нижне-Киреунские источники (или *Малый ключ*) расположены в пойме на правом берегу р. Киревны, на абсолютной отметке 200 м, в 20 км ниже по течению от Верхне-Киреунских источников и в двух км от источника Эпепка. Здесь находятся около 20 разбросанных термопроявлений с расходами до 1.5 л/с и максимальной температурой 68°С.

Двухюрточные источники. Двухюрточные источники расположены на левом берегу реки Двухюрточной, в 1–2 км от впадения в Двухюрточное озеро (рис. 2). Разгрузка термальных вод происходит в виде многочисленных восходящих мелких и крупных одиночных выходов. Суммарный расход термальной воды оценивается в 29 л/с, температура выходов от 20°С до 78°С. Выходы представлены четырьмя группами

Таблица 2. Химический (макрокомпоненты, мг/л) и изотопный (δD и $\delta^{18}O$, ‰ V-SMOW; Тригий, т.е.) состав термальных вод Киреунских и Двухюрточных источников. Звездочкой (*) обозначены данные из работы (Кирсанова, 1971).

Table 2. Chemical (major species, mg/L) and isotopic (δD and $\delta^{18}O$, ‰ V-SMOW; Tritium in t.u.) composition of thermal waters of the Kireunsky and Dvukhyurttochny springs. Data marked by * are from (Kirsanova, 1971).

nn	tC	pH	SiO ₂	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Li ⁺	B	δD	$\delta^{18}O$	Tr
Киреунские источники															
Верхние															
ВК1	7.5	7.36	21	2	1	2.4	0.7	0.7	3.4	15					
ВК2	92	8.04	117	410	26	28	0.2	571	130	62	2.1	19.5			
ВК7	28	7.65	50	108	8.3	10	0.5	148	37	35		5.3	-107	-14.8	15
ВК9	37	7.75	49	87	5.9	6.4	0.2	71	26	44		3.7			
ВК11	78	7.72	140	387	26	30	0.3	557	130	37		23.7	-117	-14.7	17
ВК13	98	7.81	109	362	33	28	0.2	496	125	70		21.3	-117	-14.4	1
ВК14	98	7.93	122	402	25	33	0.2	571	135	83	2-6	25.7	-122	-15.4	
ВК16	98	7.9	122	452	27	40	0.3	641	154	62		22.6	-128	-14.7	11
ВК17	16	7.25	36	50	4.5	6	0.6	67	17	22		2.0			
ВК21	96	7.28	146	496	34	41	0.1	734	174	56	3.0	28.2	-131	-14.9	2
ВТ1*	98	7.4	153	371	27	30	1.83	539	119	59		11.4			
ВТ2*	98	6.9	149	507	34	40	1.22	737	159	55		15.7			
ВТ3*	91	7.4	151	510	41	40	0.61	740	162	55		15.6			
ВТ4*	84	7	157	520	42	36	1.12	752	169	61		16.6			
Средние															
СК1	62	8.19	138	541	17	26	1.9	681	156	66		25.7			
СК2	77	8.3	123	552	18	26	0.8	702	173	137		26.8			
СК3	74	7.7	150	532	19	24	1.5	709	161	134		30.3	-130	-16.2	7
СК4	67	8.25	147	520	19	26	1	684	165	127		29.9			
СК5	18	6.25	44	60	5.6	6.6	0.8	82	21	26		3.1			
СК6	17	7	43	52	5.4	7	0.9	71	19	25		2.9			
СТ1*	77	7	154	49	19	24	1.22	596	169	142		16.9			
Малые															
МК1	26	7.24	87	236	15	11	1.7	294	79	112		14.7	-121	-12.2	
МК2	35	7.5	88	224	14	7.2	1.7	269	77	102		14.2	-117	-16.6	
МК3	30	7.22	87	201	12	6.8	1.9	232	76	93		11.6	-108	-10.8	
КС1*	36	7.1	80	211	12	7.4	0.4	227	78	112		7			
Восточные	23	7.0	60	183	7	19	3.7	226	103	64		11			
Центральные	37	8.2	114	272	11	13	2.2	337	91	129	1.0	16			
Северные	60	8.1	52	341	14	21	3.1	420	173	79		28			
Западные	50	7.8	46	333	14	10	1.2	388	94	134		5.8			

источников: Центральные, Западные, Южные и Восточные.

Центральная группа расположена в километре от западного берега озера, у подножья левого борта долины реки на термальной площадке 400×400 м. Абсолютная отметка источников 280 м. Всего насчитывается около 170 выходов с температурой до 76°C. Вся разгрузка дренируется одним ручьем со средним годовым расходом 24 л/с. Надне отдельных грифонов идет образование глобулярного марказита (пирита?) (Озерова и др., 1970). Источники газируют.

Южная группа расположена ближе к реке, в одном км на юго-запад от Центральной группы, и состоит из одного крупного и нескольких мелких выходов. Абсолютная отметка источников 300 м. Основной выход с температурой 78°C представляет собой газирующую ванну диаметром около 4 м и расходом 3 л/с. Здесь также образуются конкреции сульфида железа.

Западная группа расположена выше по долине, на левом берегу ручья Второго Термального, в полутора км на запад-северо-запад от Центральной группы. Абсолютные отметки группы 310–325 м. Группа состоит из нескольких участков, на которых насчитывается около 20 выходов с температурой 20–56°C и суммарным дебитом около 2 л/с. Источники слабо газируют.

Восточная группа расположена на северном берегу озера Двухюрточное, в пределах пляжной зоны (270 м абс.) Мигрирующий выход имеет расход до 1 л/с и температуру до 46°C. Источники слабо газируют.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Измерения физико-химических параметров термальных источников и речных вод (рН, Eh и температура, °C) проводились непосредственно в точках отбора проб с помощью полевых рН-метра, потенциометра и ртутного термометра. Для определения расхода водотоков использовался поплавковый метод. Пробы сульфата на изотопный состав серы готовились в лаборатории осаждением BaSO_4 из 1 л водной пробы 10% раствором BaCl_2 с последующим промыванием осадка разбавленной соляной кислотой для удаления BaCO_3 и дистиллированной водой. Отбор свободных газов проводился с помощью титановой воронки, шприца на 150 мл и трехходового крана в стеклянные бутылки объемом 200 мл методом вытеснения. При отборе газа из кипящих источников оценивалось отношение газ/конденсат пара, т.е. газосодержание термальной воды. Газовые анализы выполнялись в Институте вулканологии ДВО АН СССР (в настоящее время это Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН)

методом газовой хроматографии. Определение концентраций основных катионов и анионов (Na, K, Ca, Mg, F, Cl, SO_4) в водных пробах также выполнялось в Институте вулканологии ДВО АН СССР методами мокрой химии (аналитик В.К.Марынова). Изотопные составы воды ($\delta^{18}\text{O}$ и δD), серы растворенного сульфата ($\delta^{34}\text{S}-\text{SO}_4$) и углерода CO_2 ($\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$) были проанализированы в Геологическом институте АН СССР (г. Москва), используя методологии Лаборатории геохронологии и изотопной геохимии, на масс-спектрометре МИ-1201. Изотопный состав кислорода растворенного сульфата измеряли в ГЕОХИ АН СССР (В.И. Устинов), так же, как и изотопный состав гелия (А.Л. Плешаков). Подготовка проб на определение трития проводилась в Институте вулканологии ДВО АН СССР (аналитик Т.Б. Кудрявцева), а пробы анализировались в Институте водных проблем АН СССР (В.В. Романов).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Химический и изотопный состав вод. Химический и изотопный состав термальных вод приведен в Таблице 2. По Киреунским источникам приведены данные полевых работ 1987–88 гг., а также добавлены анализы проб, отобранных в 1969 г. (Кирсанова, 1971) и отдельные пробы 1989–1991 гг. Двухюрточные источники представлены пробами 1988–1991 гг. Измерен также изотопный состав растворенного сульфата, $\delta^{34}\text{S}-\text{SO}_4$ и $\delta^{18}\text{O}-\text{SO}_4$ (табл. 3). На рис. 4 представлены графики, которые можно назвать линиями смешения, поскольку они показывают хорошую корреляцию между содержаниями хлорид-иона и основными ионами — сульфат-ионом и натрием, а также бором и изотопным составом водорода воды. Отчетливо видны две линии смешения: «Киреунская» и «Двухюрточная». И только корреляция Cl- δD является общей для двух групп. Кроме того, точки для Озерной и Нижне-Киреунской групп выпадают из корреляции между хлоридом и сульфатом, а точки для группы Малых Киреунских — из корреляции между хлоридом и δD . Концентрация хлорид-иона в воде Киреунских и Двухюрточных примерно одинакова, что может свидетельствовать о едином источнике хлоридно-натриевых вод для этого геотермального района. Аналогом может быть Мутновский геотермальный район, где Вилучинские, Нижне-Жировские и Войновские источники, находящиеся на удалении от района восходящего потока геотермального флюида, имеют примерно одинаковые максимальные концентрации хлорида, немного ниже, чем в воде, вскрытой скважинами основного термального участка (Таран и др., 1986). С другой

Таблица 3. Изотопный состав серы (‰ V-CDT) и кислорода растворенного сульфата (‰, V-SMOW).

Table 3. Isotopic composition of sulfur (‰ V-CDT) and oxygen of the dissolved sulfate (V-SMOW).

Шифр пробы	$\delta^{34}\text{S-SO}_4$	$\delta^{18}\text{O-SO}_4$	SO_4 , мг/л	$\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$
ВК11	9.6	-3.7	130	-14.7
ВК14	10	-4.2	135	-15.4
ВК16	9.9	-5.6	154	-14.7
ВК21	10	-3.7	174	-14.9
ДЮ5	16.5	1.74	566	-13.8
ДЮ6	18	1.54	585	-13.8
ДЮ7	24.2	1.53	811	-14.4
ДЮ8	23.6	2.27	893	
ДЮ9	15.3	2.42	355	-13.4
ДЮ11	18.9	1.78	620	-14.1

Примечание. Приведены концентрации сульфат-иона и изотопный состав кислорода воды. Шифры проб, как в табл. 2.

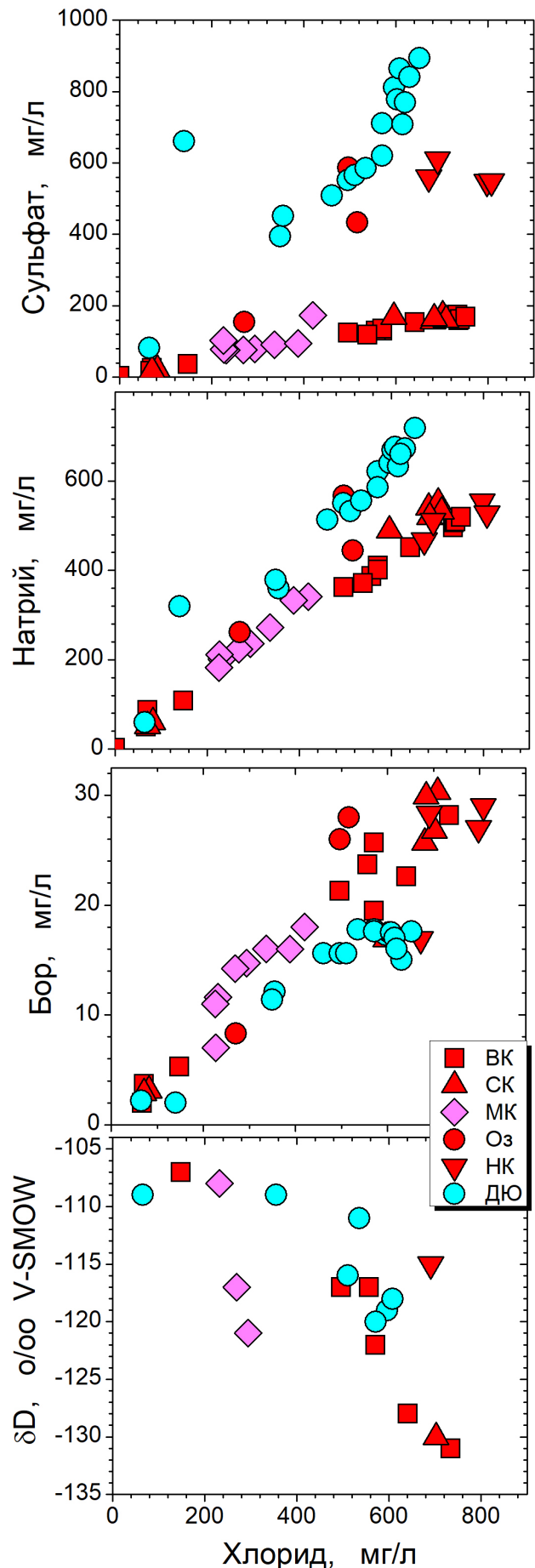
Note. Also are shown the concentrations of SO_4 and isotopic composition of oxygen of water. Sample numbers as in Table 2.

стороны, тренды смещения для Киреунских и Двухюрточных источников разные, что может указывать на самостоятельные условия формирования этих источников и позволяет говорить о двух независимых гидротермальных системах. Особенно это выражено в различии отношений хлор/сульфат. Существенно более высокое содержание сульфат-иона в водах Двухюрточных источников и разница в изотопном составе серы сульфата возможно свидетельствуют о дополнительном источнике сульфата, связанном с фильтрацией термального раствора через толщи гидротермально измененных пород, обогащенных сульфатными минералами (гипс, ангидрит, алуниты). Этому предположению не противоречит корреляция между сульфат-и кальций-ионами (рис. 5). С другой стороны, такая корреляция может отражать простое разбавление более глубокого «первичного» хлоридно-натриевого раствора, содержащего, как правило, невысокие концентрации сульфат-иона, более поверхностными Na-Ca-SO₄ водами, сформировавшими свой ионный состав за счет взаимодействия с породой менее глубоких горизонтов.

Интересно сравнить относительные содержания бора, хлорид-иона и редких щелочей в водах Киреунских и Двухюрточных источников,

Рис. 4. Линии смешения для Киреунских и Двухюрточных источников. Условные обозначения см. на рис. 2.

Fig. 4. Mixing lines for Kireunsky and Dvukhyurtochny springs. Symbols as in Fig.2.



а также с содержанием этих компонентов в водах других гидротермальных систем Камчатки. Анализ рис. 6 показывает, что кипящие Киреунские источники по составу редких щелочей, а также по относительным содержаниям хлорида, бора и лития мало отличаются от других кипящих высокотемпературных систем Камчатки. Это указывает на примерно идентичные условия взаимодействия вода-порода для высокотемпературных систем. Гидротермальные системы с более низкими температурами резервуаров формируются в более разнообразных литологических окружениях и поэтому демонстрируют значительные вариации относительных концентраций

На рис. 4 хорошо выражена также отрицательная корреляция между хлоридом и δD , означающая, что, как для Киреунских, так и для Двухюрточных источников, наиболее изотопно-облегченная вода содержит максимальные

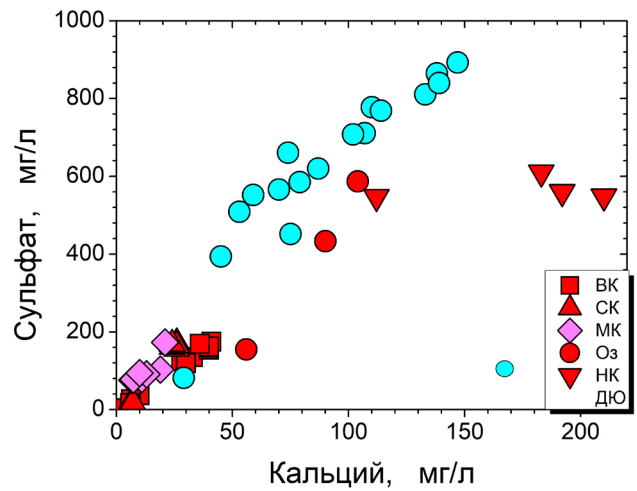


Рис. 5. Соотношение между Ca и SO_4 в водах Киреунских и Двухюрточных источников.

Fig. 5. Relationship between Ca and SO_4 in waters of Kireunsky and Dvukhyurtochny springs.

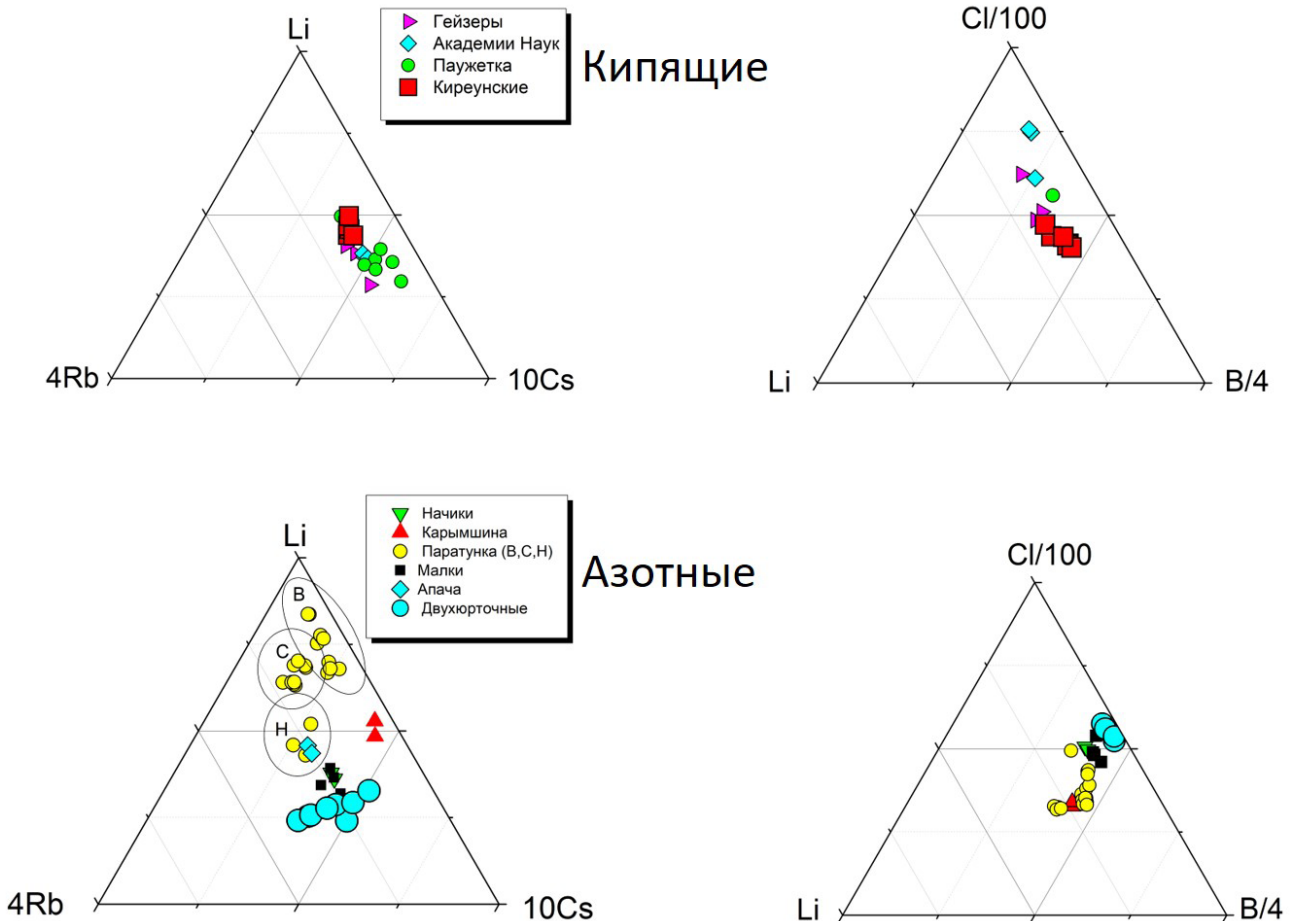


Рис. 6. Относительные содержания Li, Rb и Cs, а также Cl, B и Li в водах Киреунских и Двухюрточных источников по сравнению с составами вод других кипящих и азотных гидротермальных систем Камчатки. Данные из этой работы и монографий (Арсанова, 1974; Трухин, 2003). Группы точек В, Н и С соответствуют Верхним, Средним и Нижним группам Паратунской системы

Fig. 6. Relative amounts of Li, Rb and Cs and also Cl, Li and B in waters of Kireunsky and Dvukhyurtochny springs compared to the compositions of waters of other boiling and N_2 -rich hydrothermal systems of Kamchatka. Data from this work and from (Arsanova, 1974; Trukhin, 2003).

концентрации хлорид-иона. Это свидетельствует о том, что водное питание гидротермальной системы осуществляется на более высоких гипсометрических уровнях, чем разгрузка термальных вод, а термальные воды разбавляются водами, с изотопным составом примерно соответствующим абсолютным высотам разгрузки. «Высотный» эффект формирования изотопного состава метеорных вод для δD зависит от климата и широты местности, но в среднем равен 2‰ на 100 м высоты (Васильчук, Чижова, 2010; Gat, Gonfiantini, 1981). Это означает, что разница примерно в 25‰ между разбавленными и концентрированными водами Киреунских источников соответствует разнице примерно 1200 м между зоной разгрузки и зоной водного питания, что соответствует высоте обширной зоны измененных пород на склонах массива Алней-Чашаконджа в верховьях рек Киревны и Белой. Разница в изотопных составах между наиболее хлоридными и разбавленными водами для Двухюрточных источников составляет около 15‰, что соответствует разнице высот около 700 м. Это может означать, что зоны водного питания двух систем — Киреунской и Двухюрточной — удалены друг от друга и расположены на разных абсолютных высотах. С другой стороны, вода Двухюрточных источников может быть сильнее разбавлена поверхностными грунтовыми водами. Выпадающие из общего тренда Cl- δD точки для Малых Киреунских источников видимо отражают изотопный состав поверхностных вод этого участка, формирующийся, главным образом, на водораздельном хребте между долинами реки

Киревны и Двухюрточного озера, абсолютная высота которого превышает 1000 м (рис. 2). Сказанное подтверждают поведение трития в водах Киреунских источников (рис. 7, табл. 2). Не вдаваясь в подробности геохимии трития (Ферронский, Поляков, 1986), можно сказать, что наиболее концентрированные по хлору воды, кроме того, что они формировались на больших высотах, еще и наиболее древние. Это следует из того, что концентрация радиоактивного трития в природных водах уменьшается во времени в соответствии с периодом полураспада трития, составляющим 12.3 года, и в водах старше примерно 50 лет тритий практически не определяется.

Взаимодействие вода-порода и геотермометрия. Взаимодействие термальных вод с породой приводит к специфическим отношениям между растворенными компонентами, во многих случаях контролируемым равновесием между растворенными компонентами и вторичными минералами вмещающих пород. Достаточно простые правила оценки температур этих равновесий и соответствующие диаграммы, как для растворов, так и для газов, предложены В. Гиггенбахом в серии статей и в обобщающих работах (Giggenbach, 1988, 1991). Подход Гиггенбаха был продолжением работ П.О. Фурнье и А.Х. Трюсделла, предложившим геотермометры на основе отношений Na/K/Ca и концентрации SiO_2 (Fournier, 1977; Fournier, Truesdell, 1973). Рассмотрим диаграммы, показывающие, насколько близки к равновесию с породой воды Киреунских и Двухюрточных источников (рис. 8а, 8б).

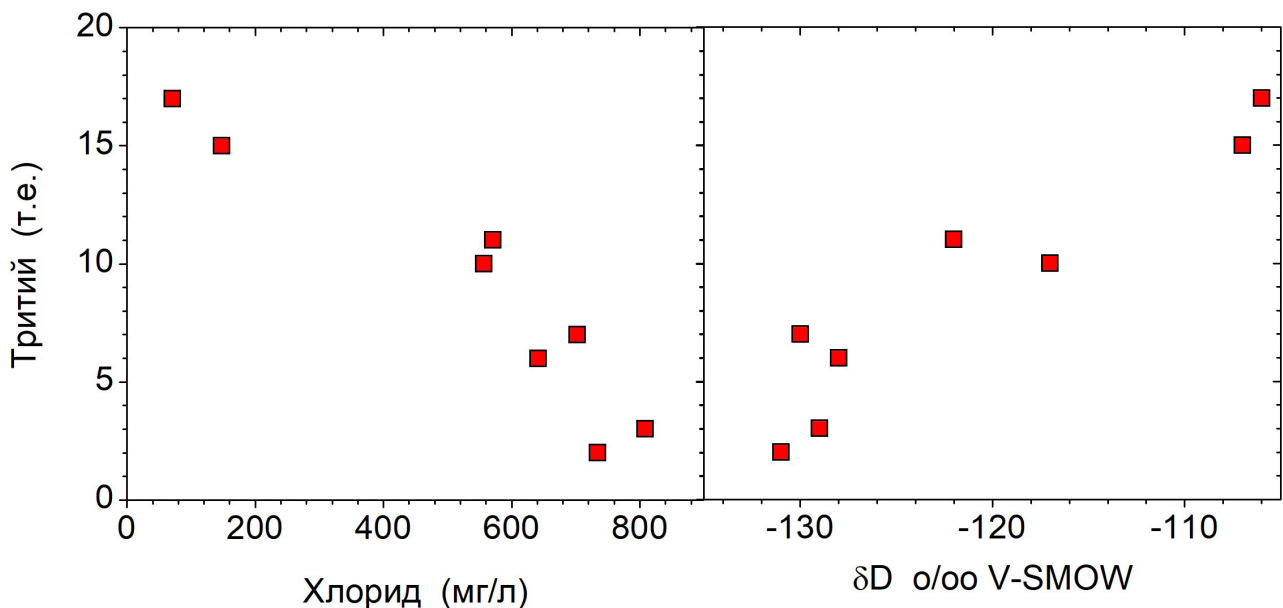


Рис. 7. Корреляции между содержанием трития (т.е., тритиевые единицы, $T/H=10^{-18}$), хлорид-ионом и δD для Киреунских источников

Fig. 7. Correlation between the concentrations of Tritium (t.u. — Tritium units, $T/H=10^{-18}$), chloride and δD for Kireunsky springs.

На диаграмме Na-K-Mg (рис. 8а) можно видеть, что точки составов ложатся в область «частичного» равновесия и по отношению Na/K отвечают равновесию в интервале температур 150–250°C для Киреунских и около 150°C для Двухюрточных источников, а точки для отношений K/Mg — в интервале температур равновесия от 70°C до 150°C для обеих систем. Это типичное распределение точек для около нейтральных термальных вод, показывающее частичное «переуравновешивание» вод при подъеме к поверхности за счет сравнительно быстрых процессов обмена раствора с Mg-содержащими минералами при падении температуры. Диаграмма Ca-Mg-K (рис. 8б) показывает, что обе системы близки к равновесию с кальцитом при парциальном давлении CO₂ более высоком для Киреунских источников, что подтверждается также более высокими концентрациями CO₂ в свободных газах Киреунских источников. Более наглядный график, оценивающий глубинные температуры на базе традиционного SiO₂ геотермометра, показан на рис. 8в. Здесь приведена диаграмма смешения в координатах SiO₂-Cl. Глубинная температура по SiO₂-геотермометру оценивается по максимальной концентрации SiO₂, которая примерно соответствует максимальной концентрации хлорид-иона. На графике показано, что SiO₂-температуры для Киреунских источников равны 160°C, а для Двухюрточных 105°C. Различие SiO₂ и Na-K температур (рис. 8а, 8в) обычно для термальных вод и связано с осаждением кремнекислоты по мере подъема термальной воды к поверхности. Отношение же элементов не зависит от разбавления и сохраняется при падении температуры из-за слишком медленной скорости соответствующих реакций

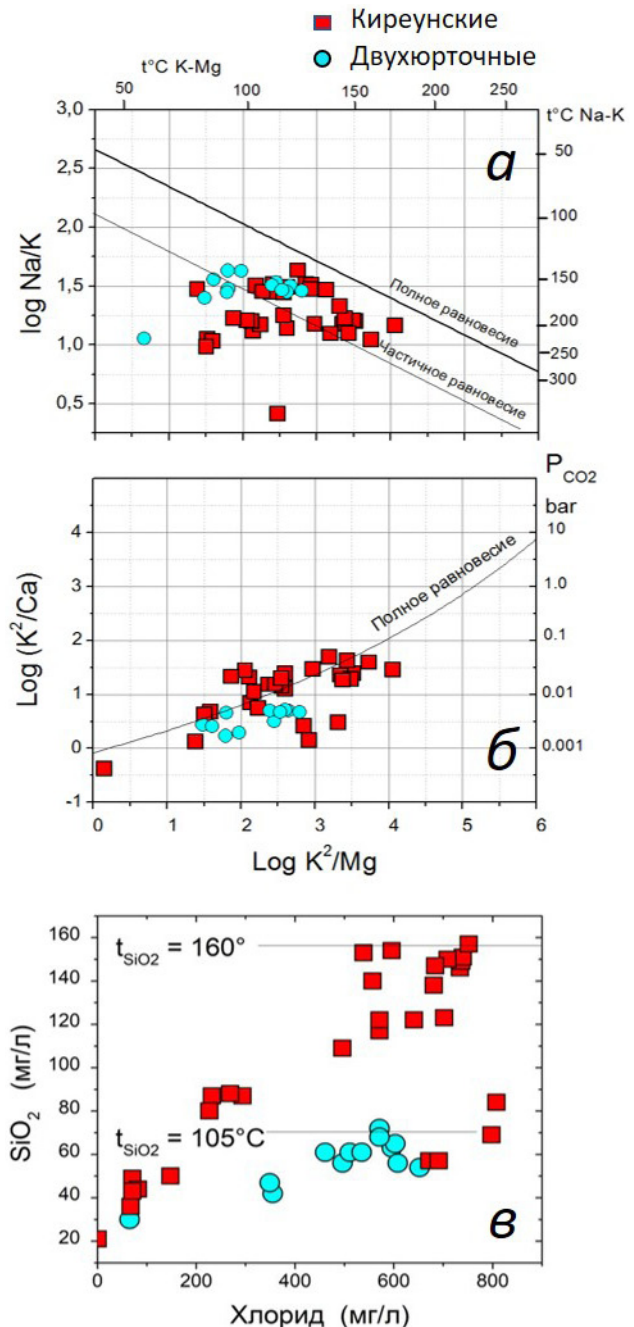
Рис. 8. Гидрохимическая геотермометрия. Диаграммы У.Ф. Гиггенбаха (Giggenbach, 1988), с изменениями. Диаграмма (а) показывает температуры равновесия между раствором и минералами, содержащими Na, K и Mg. Линия «полного» равновесия построена по равенству температур геотермометров Na-K и K-Mg. Линия на диаграмме (б) соответствует равновесию раствора с минералами, содержащими Ca, Mg и K, включая кальцит, устойчивость которого зависит от парциального давления CO₂ в системе. Поэтому ордината графика может быть представлена также величиной P_{CO₂} (для более детального объяснения см. (Giggenbach, 1988)). Диаграмма смешения (в) показывает SiO₂-температуру по максимальной содержанию растворенного кремнезема. Пояснения см. в тексте.

Fig. 8. Hydrochemical geothermometry. Diagram of W.F. Giggenbach (Giggenbach, 1988). The upper diagram (а) shows equilibrium temperatures between solution and minerals with Na, K and Mg. The «full equilibrium» line is made as the equivalence of Na-K and K-Mg temperatures. The line on the diagram (б) corresponds to equilibrium between minerals containing K, Mg and Ca, including calcite those stability depends on the partial pressure of CO₂ (for more details see (Giggenbach, 1988)). Mixing diagram (в) shows SiO₂-temperature for the maximum dissolved silica concentrations. See text.

минерал-раствор (Fournier, 1977; Giggenbach, 1988). Интересно, что на тренды Двухюрточных источников для SiO₂ ложатся точки Нижних Киреунских источников (рис. 8в).

Изотопный состав растворенного сульфата.

При анализе изотопного состава серы и кислорода растворенного сульфата в воде обеих гидротермальных систем (табл. 3) обращает на себя внимание значительное расхождение в величинах как δ³⁴S, так и δ¹⁸O. Однако наблюдается ясно



выраженная положительная корреляция между $\delta^{34}\text{S}$ и концентрацией сульфат-иона (рис. 9а). Такое поведение выглядит необычным, как простое смешение двух составляющих: воды Двухюрточных источников с максимальной концентрацией сульфат-иона и воды Верхних Киреунских источников со сравнительно низкими концентрациями сульфат-иона. Необычность в том, что выходы Киреунских и Двухюрточных источников, несмотря на практически одинаковые содержания хлорид-иона, расположены достаточно далеко друг от друга и характеризуются различными линиями смешения химических компонентов, т.е. глубинные составляющие у них выглядят разными, разного происхождения.

К сожалению, в настоящее время отсутствуют изотопные данные для Нижних Киреунских источников с высоким содержанием SO_4 .

Изотопный состав кислорода растворенного сульфата может служить индикатором температуры равновесия изотопного обмена между водой и растворенным сульфатом. Линии температур изотопного равновесия построены в координатах $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O} - \delta^{18}\text{O}-\text{SO}_4$ с использованием данных из работы (Mizutani, Rafter, 1969), а точки составов отложены по данным для кислорода сульфата и кислорода воды (рис. 9б, табл. 3). Из диаграммы следует, что существенно различные изотопные составы кислорода сульфата в воде двух групп источников контролируются температурой, и что «изотопные» температуры в общем близки к температурам, оцененным по химическому составу термальных вод.

Известно, что в Двухюрточных источниках происходит отложение глобулярного пирита

(Озерова и др. 1970). Изотопный состав серы этого пирита сильно облегчен: $\delta^{34}\text{S} = -40\text{‰}$ (Виноградов, 1980). Это означает, что пирит образован за счет биогенной сульфат-редукции, т.е. за счет сероводорода, образованного термофильными сульфат-редуцирующими бактериями, из растворенного сульфата. Этот процесс достаточно хорошо изучен, и классификация таких бактерий — это целое направление в микробиологии (Henry et al., 1994; Johnston et al., 2007). Интересно, что фракционирование изотопов серы при этом (разница между изотопным составом серы пирита и серы растворенного сульфата Двухюрточных источников), около 55‰, согласно калибровке Sakai (1968), соответствует температуре равновесия около 70°C, т.е. температуре источников.

Геохимия свободных газов. В газах Верхне-Киреунских источников преобладает азот, но они содержат до 32% CO_2 (табл. 4). В Нижне-Киреунских углекислоты гораздо меньше, а газы Двухюрточных источников почти на 99% представлены азотом. Источником азота и аргона в газах термальных вод служит главным образом воздух, растворенный в воде, питающей гидротермальную систему. Часть азота может поступать в воду из вмещающих пород, а часть иметь более глубинное происхождение (Taran et al., 2002 и ссылки в этой работе). Гелий в основном имеет глубинное происхождение — мантийное или из пород коры (Мамырин, Толстихин, 1981). Количество воздушного гелия определяется отношением He/Ne , которое в воздухе равно примерно 0.3, а в коре и мантии $> 10\ 000$. Аргон и неон в геотермальных газах имеют в основном воздушное происхождение. Отношение N_2/Ar

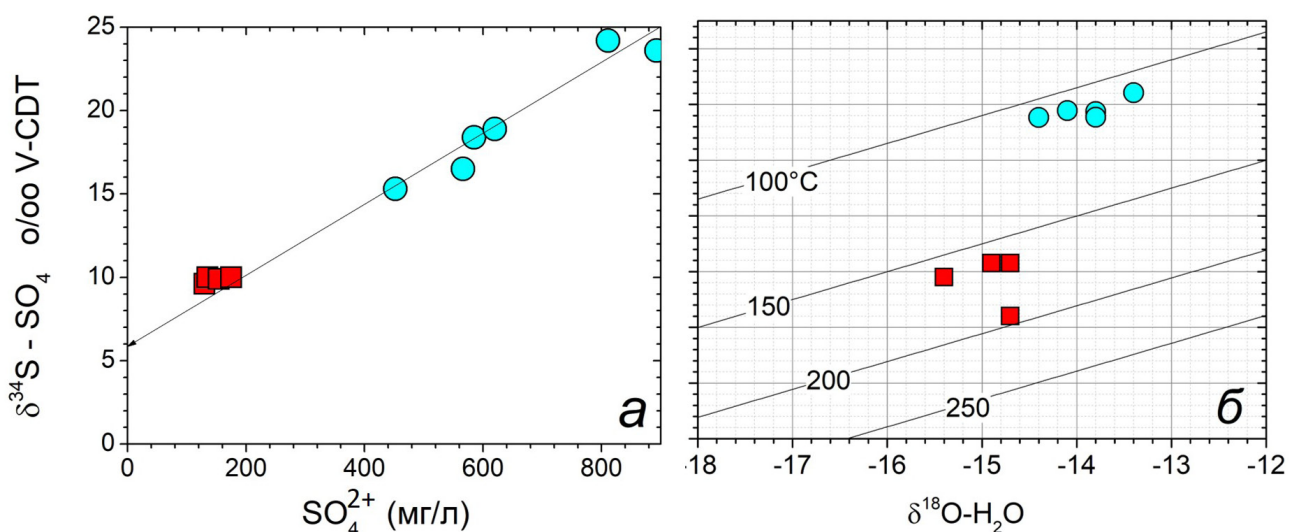


Рис. 9. Соотношение между изотопным составом серы и концентрацией растворенного сульфата (табл. 3) (а). Изотопный состав кислорода сульфата для Киреунских и Двухюрточных источников (б). Условные обозначения см. на рис. 8.

Fig. 9. Relationship between sulfur isotopic composition of sulfate and sulfate concentration (Table 3) (a). Isotopic composition of the oxygen of sulfate for Kireunsky and Dvukhyurtochny springs (b). Symbols as in Fig.8

Таблица 4. Химический (моль%) и изотопный ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ и $^3\text{He}/^4\text{He}$) состав газов Киреунских и Двухъярточных источников.
 Table 4. Chemical (mol%) and isotopic ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ and $^3\text{He}/^4\text{He}$) composition of gases from Kireunsky and Dvukhyurtchny springs.

Проба	tC	He	Ar	H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	CH ₄	X _g	$\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$	$^3\text{He}/^4\text{HeR/Ra}$	He/Ne	N ₂ /Ar корр.
Киреунские источники													
ВК2	98	0.002	1.43	0.043	0	65.8	32.7	0.02	1.4*	-12.5	6.5	2.8	46
ВК13	98	0.002	1.15	0.05	9.1	82.5	7.2	0.04	1.7*	-15.9			65
ВК21	46	0.0015	1.23	0.01	2.3	86.4	3.2	0.02	1.3	-9.9			69
Рожков и Верховский (1990)	98	0.002	2.03	0.005	1.6	72.1	24.2	0.03	0.8		5.6	1.9	34
Двухъярточные источники													
ДЮ1	75	0.027	0.51	0.001	1.06	97.1	1.02	0.74	2.9	-7.1	3.7	124	201
ДЮ5	65	0.023	0.45	0.0015	0.45	98.8	0.25	0.48	3.3				226
ДЮ6	63	0.021	0.52	0.002	0.02	99.2	0.31	0.42	2.9				191
ДЮ7	74	0.023	0.32	0.0007	0.42	96.4	0.81	1.02	4.8				315
ДЮ8	23	0.017	0.63	0.001	0.18	98.8	0.88	0.11	2.4				158
Рожков и Верховский (1990)	75	0.042	0.51		0	97.2	1.08	1.17	2.9		2.7	156	191

Примечания. X_g — газосодержание в ммоль/кг. R= $^3\text{He}/^4\text{He}$ в единицах R/Ra, где Ra — атмосферное отношение, равное 1.39×10^{-6} (Мамырин и Толстихин, 1981). $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ в ‰ V-PDB. Для двух проб Киреунских источников (*) X_g измерено, для остальных оценено по методу, предложенному в Таран (2005). N₂/Ar_{корр} означает коррекцию на содержание кислорода воздуха.

Note. X_g — gas content in mmol/kg. R = $^3\text{He}/^4\text{He}$ in units R/Ra where Ra = 1.39×10^{-6} — atmospheric value (Mamyurin and Tolstikhin, 1981). $\delta^{13}\text{C}$ in ‰ V-PDB. For two samples of Kireunsky springs X_g was measured, for the others — estimated using expressions in Taran (2005). N₂/Ar_{corr} means a correction for the air contamination.

воздухе равно 83, а в водорастворенном воздухе при 10°C — 37. Эти цифры приводятся, например, в работе (Рожков, Верховский, 1990). Поэтому на рис. 10а, проведены две линии, соответствующие воздушному и водорастворенному (ВНВ — вода, насыщенная воздухом) отношениям (Giggenbach, 1991). Точки газовых составов для Киреунских источников соответствуют смеси воздуха и водорастворенного воздуха. Точки же для Двухюрточных источников ложатся значительно выше воздушной линии, т.е. свидетельствуют о наличии не атмосферного азота в этих газах. Этот факт был отмечен еще в работе. (Озерова и др., 1970). Природа этого «избыточного» азота может быть как коровая, так и магматическая. Значения отношений $^3\text{He}/^4\text{He}$ (табл. 4) для Киреунских источников (5.6–6.5Ra) близки к значениям, характерным для вулканических газов и высокотемпературных геотермальных систем Камчатки (Таран, 2009), а для Двухюрточных — существенно ниже (2.7–3.7 Ra), но тоже со значительной долей мантийного ^3He . Здесь $Ra = 1.39 \times 10^{-6}$ — воздушное отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ (Мамырин, Толстихин, 1981). Отношение He/Ne в газах Двухюрточных источников выше 100, что свидетельствует о высокой доле неатмосферного гелия в газовых пробах. Другими словами, в газах Двухюрточных источников имеется значительная доля коровой составляющей, от 50% до 70%, имеющей гелиевое отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ около 0.02 Ra. Это значит, что избыточный азот тоже, скорее всего, имеет коровое происхождение и образован за счет разложения осадочного органического вещества. Таким образом, можно предположить, что в зоне формирования Двухюрточных источников смешиваются два типа газов: коровые газы и «гидротермальные» газы, потерявшие большую часть CO_2 и другие газовые компоненты по пути к разгрузке, но сохранившие остатки гелия с магматической изотопной меткой.

В составе газов Киреунских и Двухюрточных источников обнаружены также водород и CO_2 (табл. 4). Их концентрации, так же, как и концентрации растворенных ионов и кремнекислоты, позволяют оценить температуры равновесия между газами и вторичными минералами вмещающих пород. Газовая геотермометрия была разработана несколько десятилетий тому назад (Arnorsson, Gunnlaugsson, 1985; Giggenbach, 1980; Таран, 1986) и основана как на термодинамических построениях, так и на эмпирических данных. Абсолютные концентрации газов рассчитываются из общего газосодержания воды конкретного термального выхода (X_g) и состава газов. Общее газосодержание может быть или измерено, или оценено с помощью метода, предложенного, например, в работе (Таран, 2005). Температуры, вычисленные по концентрациям

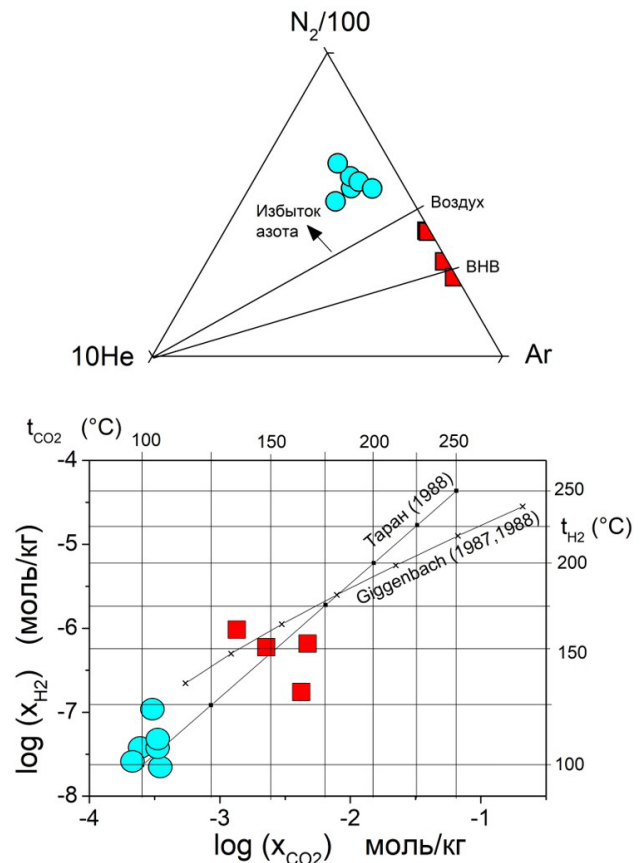


Рис. 10. Газовая геохимия и геотермометрия. Верхний график — треугольная диаграмма, показывающая относительные содержания N_2 , Ar и He в газах Киреунских и Двухюрточных источников. См. текст. Нижний график — диаграмма, позволяющая оценить температуру равновесия растворенных газов с породой. Сетка проведена согласно эмпирическим H_2 - и CO_2 -геотермометрам, построенным в работе (Таран, 1988). Добавлена также прямая, построенная с использованием термодинамических и полуэмпирических данных в работах (Giggenbach, 1987, 1988). Условные обозначения см. на рис. 8.

Fig. 10. Gas geochemistry and geothermometry. The upper ternary plot shows relative amounts of N_2 , Ar and He in gases of Kireunsky and Dvukhyurtochny springs. See text. The lower plot presents a diagram for the estimation of the equilibrium temperature of dissolved gases and rock. The grid corresponds to the empirical geothermometers derived by Taran (1988). Also a line is shown plotted using thermodynamic and semi-empirical data by (Giggenbach, 1987, 1988). Symbols as in Fig. 8.

H_2 и CO_2 , в случае Киреунских источников близки, несмотря на значительный разброс точек (рис. 10б). Они также близки к температуре 160°C, оцененной по SiO_2 -геотермометру (рис. 8в). Для Двухюрточных источников CO_2 - и H_2 -температуры практически не различаются и также близки к SiO_2 -температурам (около 100°C). Таким образом, газовая термометрия в формулировке (Таран, 1988) дает температуры, сравнимые с SiO_2 -температурами для обеих гидротермальных систем. Соотношения

У.Ф. Гиггенбаха (Giggenbach, 1987, 1988) дают более низкие температуры, в частности, для H_2 — ниже температуры источников.

Газы Киреунских и Двухюрточных источников значительно отличаются также по концентрациям метана. В газах Двухюрточных источников метана гораздо больше — до 1 моль% против 0.02–0.04 моль% в газах Киреунских источников. Это еще раз подтверждает значительную долю коровой составляющей в газах Двухюрточных источников, вероятно связанную с деструкцией органического материала осадочных пород под действием температуры (термогенный метан).

Различия в изотопном составе углерода CO_2 (табл. 4) для двух групп источников (от –10‰ до –16‰ для Киреунских и –7.1‰ для Двухюрточных) можно объяснить значительной степенью дегазации гидротермального флюида и соответствующим изотопным фракционированием для Киреунской гидротермальной системы. Такие значения весьма типичны для кипящих источников с N_2 - CO_2 составом газов, разгружающихся после значительного латерального перетока от главного восходящего потока флюида (Таран et al., 2004). Вероятно, исходный CO_2 для Киреунской гидротермальной системы имел изотопный состав, близкий к магматическому (около –5‰). Изотопный состав CO_2 единственной пробы из Двухюрточных источников объяснить трудно, необходимы дополнительные исследования и больше анализов.

Вынос тепла. Естественный вынос тепла Киреунскими и Двухюрточными источниками оценивается с помощью измеренных расходов и температуры выходов. Так называемый, «хлоридный» метод заключается в измерении расхода дренирующего термальной участок водотока, и по содержанию в нем хлорид-иона рассчитывается расход термальной воды с максимальной температурой и, как правило, имеющей максимальную концентрацию хлорид-иона. Этот метод давно и широко применяется в

отечественной гидротермальной гидрогеологии. В последнее десятилетие Геологическая Служба США публикует серию работ по выносу тепла термальными водами Йеллоустонской кальдеры, основанных на измерении расхода и содержания хлорид-иона в воде рек, дренирующих термопроявления кальдеры (Hurwitz, Lowenstern, 2014; Hurwitz et al., 2020 и ссылки в этих работах). Суммарные данные по расходу отдельных групп Киреунских и общему расходу Двухюрточных источников по величине естественного выноса тепла, т.е. тепловой мощности источников представлены в табл. 5. Если бы термальные воды по мере подъема к поверхности не охлаждались за счет кондуктивных и других потерь тепла, их теплосодержание было бы близким к теплосодержанию на глубине. Поэтому потенциальная тепловая мощность обеих систем оценивается для температур, рассчитанных по гидрохимическим геотермометрам. С учетом неизбежных ошибок при таких оценках принимаются температуры 200°C для Киреунских и 100°C для Двухюрточных источников. Рассчитанный вынос тепла Киреунскими источниками около 22 МВт практически совпадает с оценкой, приведенной в работе (Кирсанова, 1971) — 21 МВт. С учетом глубинной температуры при среднем содержании хлорид-иона 550 мг/л тепловая мощность Киреунской гидротермальной системы оказывается высокой, но существенно ниже, чем мощность других кипящих систем Камчатки: разбуренных — Паужетской, Большебанной, Мутновской — и неразбуренных — Узон-Гейзерной и Больше-семячической (Sugrobov, 1995)

Модель геотермального района и нерешенные проблемы. Основной проблемой является установление связи между Киреунскими и Двухюрточными источниками. Другими словами, нужно понять, являются ли они поверхностными термопроявлениями одной глубинной гидротермальной системы с различиями, обусловленными геологическими и структурными

Таблица 5. Расходы и естественный вынос тепла Киреунскими и Двухюрточными источниками.

Table 5. Flow rates and heat discharge by the Kireunsky and Dvukhyurtochny springs.

Источники	°С, макс.	Расход, л/с	Естественная тепловая мощность (вынос тепла), МВт	Мощность с учетом глубинной температуры МВт
Верхние Киреунские	100	40	16.7	
Средние Киреунские	80	2	0.7	
Малые Киреунские	60	10	2.5	
Озерные	42	9	1.6	
Нижние Киреунские	68	2	0.6	
Киреунские, сумма		63	22.1	52.3
Двухюрточные	78	29	9.1	12.2

особенностями зон разгрузки термальных вод на поверхность, или эти группы источников принадлежат двум различным гидротермальным системам, со своими зонами водного питания и источниками тепла. То, что такая связь может существовать, следует из очень близких концентраций хлорид-иона и сравнительной географической близости гидротермальных проявлений. Расстояние между группой Малых Киреунских и Южной группой Двухюрточных около 10 км, в то время как между Верхней и Нижней группами Киреунской системы расстояние около 20 км. Кроме того, Нижне-Киреунские источники, благодаря высоким концентрациям сульфат-иона, по составу похожи на Двухюрточные источники, за исключением немного более низкого отношения Cl/V и более высокого содержания кальция. Можно предположить, что Двухюрточные и Нижне-Киреунские источники питаются смесью хлоридно-натриевой воды глубинного формирования, близкой по составу к воде источников Верхне-Киреунской группы, и воды $Ca-(Na)-SO_4$ состава, формирующейся ближе к поверхности в контакте с породами другой фациальной принадлежности. Если это так, то «материнский», неразбавленный хлоридно-натриевый раствор, питающий кипящие Верхне-Киреунские источники должен иметь концентрацию хлорид-иона примерно в два раза выше, т.е. около 1.5 г/л.

Против единого источника хлоридно-натриевого глубинного компонента свидетельствует наличие водораздельного хребта между долинами Двухюрточного озера и Киреунского бассейна, а также показанная выше обособленность зон водного питания. Кроме того, газовый состав Двухюрточных источников имеет явную коровую составляющую, что кардинально отличает его от состава газа Киреунских источников. Высокая газовая активность Двухюрточной системы позволяет предположить наличие источника воды и газа непосредственно под термопроявлениями, без латеральной составляющей. Это предположение подтверждается структурно-тектоническим построением В.М. Зиминой⁴, который выделил значительную кольцевую структуру диаметром около 18 км и с центром, примерно совпадающем с термальными выходами Двухюрточных источников (рис. 3). Эта структура хорошо заметна на спутниковых изображениях, например, в GoogleEarth.

Таким образом, можно полагать, что обе группы источников — Киреунская и Двухюрточная — независимы и имеют самостоятельные источники теплового и водного питания. Киреунские источники — это латеральные проявления типичной гидротермальной системы с восходящим потоком под обширной зоной измененных пород в верховьях рек Киревны

и Белой. Вероятно, под этой зоной, которая когда-то была зоной разгрузки пара, расположен остывающий очаг — источник тепла. Вода с начальной температурой около 200°C по системе субширотных разломов, которые маркируются грабенообразным трогом долины р. Киревны движется по проницаемым зонам в сторону Нижне-Киреунских выходов и по зоне пересечения с разломами северо-восточного простирания разгружается на поверхность за счет достаточно высокого гидравлического градиента. Подземная циркуляция термальных вод, видимо, осуществляется на контактах между продуктами извержений вулканического комплекса Алней-Чашаконджа, а также обеспечивается трещинно-жильным характером проницаемости. Разгрузка кипящих Верхне-Киреунских источников дополнительно стимулируется градиентом давления за счет вскипания; энтальпия некоторых выходов превышает энтальпию кипящей воды, и на поверхности разгружается пароводяная смесь (Кирсанова, 1971). Вопрос о том, почему в воде Озерных и Нижне-Киреунских источниках растут концентрации Ca и сульфат-иона, остается открытым. Для данной модели увеличение концентраций этих компонентов при примерном постоянстве концентрации хлорид-иона должен обеспечиваться за счет изменения состава вмещающих пород, т.е. появления в породах повышенных содержаний гипса (ангидрита). Наличие сульфатных минералов характерно для вулканокластических отложений, а поверхностные SO_4-Ca воды с минерализацией до 2 г/л и выше известны на Камчатке (Верхне-Беловские в районе вулкана Кизимен) и в других вулканических районах (Taran et al., 1998 и ссылки в этой работе). Поэтому предполагается довольно резкая смена вулканогенной толщи, контактирующей с термальной водой, от представленной субвулканическими телами (лавовыми потоками, интрузиями) на вулканогенно-осадочную, представленную главным образом пирокластическим материалом (игнимбриты, туфы, туфопесчаники, туфоалевролиты и пр.). Эта граница проходит где-то между группами Малых Киреунских и Озерных источников.

Двухюрточная система предположительно сформирована над остывающим очагом, ответственным за создание кольцевой структуры, выделенной Зиминой⁴. Эта структура почти по диагонали пересекается региональным разломом северо-восточного простирания, который, видимо, служит проводником для газа с избыточным, «не атмосферным» азотом, радиогенным гелием и метаном. Источником хлоридно-натриевой составляющей предположительно служит гидротермальная система над почти остывшим магматическим очагом.

Разгрузка осуществляется по зонам пересечения основного С-В разлома с локальными разломами широтного направления. Источником сульфат-иона могут быть туфогенно-осадочные породы, заполняющие кольцевую структуру.

Для более детального рассмотрения условий формирования Киреунских и Двухюрточных источников необходимы дополнительные данные по гидрохимии и изотопным характеристикам растворов и газов. Так, для обеих систем необходимо иметь состав ключевых микрокомпонентов, включающий, помимо редких щелочей, также Fe, Al, Sr, Ba. Для обеих групп источников необходимо знать концентрацию сероводорода, которая может быть очень низкой, но запах H₂S отмечался при отборе проб. Из изотопных характеристик наиболее важными могут быть названы изотопный состав растворенного стронция, изотопный состав серы растворенного сульфата (для Озерных и Нижних Киреунских), изотопный состав азота и метана в газах Двухюрточных источников. Необходимо провести также детальное изотопное исследование оолитов сульфидов железа в осадках Двухюрточных источников и вообще, более детальное исследование минералогии и химии осадков для обеих систем.

Авторы выражают благодарность Е.Г. Калачевой за помощь в поисках информации, содержащейся в научно-производственных отчетах, а также Т.Ю. Самковой за предоставленный доступ к архиву В.Л. Леонова. Авторы также признательны Р.Р. Курмашовой за помощь в подготовке рисунков к статье. Рецензии Г.Н. Копыловой и Г.А. Карпова, а также редакторская помощь В.А. Рашидова значительно улучшили текст статьи.

Список литературы

- Арсанова Г.Н.* Редкие щелочи в термальных водах вулканических областей. Новосибирск: Наука, 1974. 101 с. [*Arsanova G.N.* Rare alkalies in thermal waters of volcanic areas. Novosibirsk: Nauka, 1974. 101 p. (in Russian)].
- Васильчук Ю.К., Чижова Ю.Н.* Высотный градиент распределения $\delta^{18}\text{O}$ и δD в атмосферных осадках и в снежном покрове высокогорных районов // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV. № 1. С. 13–21 [*Vasilchuk Y.K., Chizhova Yu.N.* Elevation gradient of the distribution of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in the snow cover of the high-altitude regions. Cryosphere of the Earth, 2010, V. XIV, № 1. P. 13–21 (in Russian)].
- Виноградов В.И.* Роль осадочного цикла в геохимии изотопов серы. М.: Наука, 1980. 192 с. [*Vinogradov V.I.* The role of the sedimentary cycle in the geochemistry of sulfur isotopes. Moscow, Nauka, 1980. 192 p. (in Russian)].
- Кирсанова Т.П.* Гидротермы Киреунской Долины в Среднем хребте Камчатки // Вулканизм и глубины Земли. М.: Наука, 1971. С. 239–246 [*Kirsanova T.P.* Thermal springs of the Kireunskaya Valley in the Sredinny Range, Kamchatka // Volcanism and the Earth depths. Moscow: Nauka, 1971. P. 239–246 (in Russian)].
- Леонов В.Л.* Структурные условия локализации высоко-температурных гидротерм. М.: Наука, 1989. 104 с. [*Leonov V.L.* Structural conditions of the location of high-temperature hydrothermal systems. Moscow: Nauka, 1989. 104 p. (in Russian)].
- Мамырин Б.А., Толстихин И.Н.* Изотопы гелия в природе. М.: Энергоиздат, 1981. 224 с. [*Mamyrin B.A., Tolstikhin I.N.* Helium isotopes in Nature. Moscow, Energoizdat, 1981. 224 p. (in Russian)].
- Новограбленов П.Т.* Горячие ключи Камчатки // Изв. Гос. геогр. об-ва. 1931. Т. 63. Вып. 5–6. С. 192–245 [*Novograblenov P.T.* Hot springs of Kamchatka // Izvestia Geograph. Soc., 1931. V. 31. № 5–6. P. 192–245 (in Russian)].
- Огородов Н.В., Кожемяка Н.Н.* История развития четвертичного вулканизма и морфоструктуры // Вулканы и четвертичный вулканизм Среднего хребта Камчатки. М.: Наука, 1972. С. 103–115 [*Ogorodov N.V., Kozhemyaka N.N.* History of the evolution of the Quaternary volcanism and morphology. In: Volcanoes and Quaternary volcanism of the Sredinny Range of Kamchatka. Moscow: Nauka, 1972. С. 103–115 (in Russian)].
- Огородов Н.В.* Структурное положение четвертичных эффузивов // Вулканы и четвертичный вулканизм среднего хребта Камчатки. М.: Наука. 1972. С. 95–103 [*Ogorodov N.V.* The structural position of the Quaternary effusives of the Sredinny Range of Kamchatka. In: Volcanoes and Quaternary volcanism of the Sredinny Range of Kamchatka. Moscow: Nauka, 1972. P. 95–103 (in Russian)].
- Озерова Н.А., Бородаев Ю.С., Кирсанова Т.П. и др.* Ртутьсодержащий пирит из Двухюрточных термальных источников на Камчатке // Геология рудных месторождений. 1970. № 1. С. 73–78 [*Ozerova N.A., Borodayev Y.S., Kirsanova T.P. et al.* Mercury-bearing pyrite from Dvukhyurtochny thermal springs in Kamchatka. // Geology of ore-forming deposits, 1970, № 1. P. 73–78 (in Russian)].
- Певзнер М.М.* Голоценовый вулканизм Среднего хребта Камчатки. Труды Геологического института. М.: ГЕОС, 2015. 258 с. [*Pevzner M.M.* Holocene volcanism of Sredinny Range of Kamchatka, Moscow: GEOS, 2015. 252 p. (in Russian)].
- Рожков А.М., Верховский А.Б.* Геохимия благородных газов высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1990, 167 с. [*Rozhkov A.M., Verkhovsky A.B.* Noble gas geochemistry in high-temperature hydrothermal systems. Moscow: Nauka, 1990, 167 p. (in Russian)].
- Стефанов Ю.М., Широкий Б.И.* Вулкано-тектоническая структура Алней-Чашаконджа как пример рудоносных и рудопоисковых структур Камчатки // Бюл. вулканологической станции. 1979. № 57. С. 66–71 [*Stefanov Yu.M., Shirokii B.I.* The volcanotectonic structure Alney-Chashakondzha as an example of the ore-forming structures of Kamchatka // Bull. Volcanologicheskoy. Stanstii. 1979. № 57. P. 66–71 (in Russian)].

- Taran Yu.A.* Геохимия геотермальных газов. М.: Наука, 169 с. [*Taran Yu.A.* Geothermal Gas Geochemistry. Moscow: Nauka, 1988. 169 p. (in Russian)].
- Taran Yu.A., Rozhkov A.M., Pilipenko V.P.* Геохимия гидротермальных растворов и газов Мутновского месторождения парогидротерм // Геотермические и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1986. С. 140–181 [*Taran Yu.A., Rozhkov A.M., Pilipenko V.P.* Geochemistry of hydrothermal solutions and gases of the Mutnovsky geothermal system // Geothermic and geochemical studies of high-temperature hydrothermal systems. Moscow: Nauka, 1986. P. 140–181 (in Russian)].
- Taran Yu.A., Pokrovskiy B.G., Dubik Yu.M.* Изотопный состав и происхождение воды андезитовых магм // ДАН. Т. 304. № 2. С. 440–443 [*Taran Yu.A., Pokrovskiy B.G., Dubik Yu.M.* Isotopic composition and origin of water in andesitic magmas // Doklady Earth Sciences. 1989. V. 304. № 2. P. 1191–1194].
- Трухин Ю.П.* Геохимия современных гидротермальных процессов и перспективные технологии. М.: Наука, 2003. 430 с. [*Trukhin Yu.P.* Geochemistry of modern hydrothermal processes and perspective technologies. Moscow: Nauka, 2003, 403 p. (in Russian)].
- Ферронский В.И., Поляков В.А.* Изотопия гидросферы. М.: Недра, 1983. 278 с. [*Ferronsky V.I., Polyakov V.A.* Isotopy of the hydrosphere. Moscow: Nedra, 1983. 278 p. (in Russian)].
- Шанцер А.Е., Краевая Т.С.* Формационные ряды наземного вулканического пояса (на примере позднего кайнозоя Камчатки). М.: Наука, 1980. 162 с. [*Shantser A.E., Kraevaya T.S.* Formation series of a terrestrial volcanic belt (with examples from the late Cenozoic of Kamchatka) Moscow: Nauka, 162 p. (in Russian)].
- Arnorsson S., Gunnlaugsson E.* New gas geothermometers for geothermal exploration. Calibration and application // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1985. V. 49. Iss. 6. P. 1307–1325.
- Fournier R.O.* Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems // *Geothermics*. 1977. V. 5. № 1. P. 41–50.
- Fournier R.O., Truesdell A.H.* An Empirical Na-K-Ca Geothermometer for Natural Waters // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1973. V. 37. Iss. 5. 1255–1275.
- Gat J.R., Gonfiantini R.* Eds. Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle. IAEA Technical Report Series. 1981. № 210. Vienna. 337 p.
- Giggenbach W.F.* Geothermal gas equilibria // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1980. V. 44. Iss. 12. P. 2021–2032.
- Giggenbach W.F.* Geothermal solute equilibria. Derivation of Na–K–Mg–Ca geothermometers // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1988. V. 52. Iss. 12. P. 2749–2765.
- Giggenbach W.F.* Chemical techniques in geothermal exploration // D'Amore, F. (Ed.). *Application of Geochemistry of Geothermal Reservoir Development*. UNITAR/UNDP. 1991. Rome. P. 119–144.
- Henry E.A., Devereux R., Maki J.S. et al.* Characterization of a new thermophilic sulfate-reducing bacterium *Thermodesulfovibrio yellowstonii*. *Archives of Microbiology*. 1994. V. 161. P. 62–69.
- Hurwitz S., McCleskey R.B., Bergfeld D. et al.* Hydrothermal activity in the southwest Yellowstone Plateau Volcanic Field // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2020. V. 21. Iss. 7. <https://doi.org/10.1029/2019GC008848>
- Hurwitz S., Lowenstern J.B.* Dynamics of the Yellowstone hydrothermal system // *Reviews of Geophysics*. 2014. V. 52. № 3. P. 375–411.
- Johnston D.T., Farquhar J., Canfield D.E.* Sulfur isotope insights into microbial sulfate reduction: When microbes meet models // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2007. V. 71. Iss. 16. P. 3929–3947.
- Mizutani Y., Rafter A.T.* Oxygen isotopic fractionation in the bisulfate ion–water system. *N. Z. J. Sci.* 1969. 12. P. 54–59.
- Sakai H.* Isotopic properties of sulfur compounds in hydrothermal processes // *Geochemistry J.* 1968. V. 2. № 1. P. 29–49.
- Sugrobov V.M.* Geothermal Resources of Kamchatka, Russia // *Terrestrial Heat Flow and Geothermal Energy in Asia*. Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd. New Delhi. 1995. P. 469–492.
- Taran Y.A.* A method for determination of the gas–water ratio in bubbling springs // *Geophysical Research Letters*. 2005. V. 32. Iss. 23. L23403. <https://doi.org/10.1029/2005GL024547>.
- Taran Y.A.* Geochemistry of volcanic and hydrothermal fluids and volatile budget of the Kamchatka–Kuril subduction zone // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2009. V. 73. Iss. 4. P. 1067–1094.
- Taran Y., Fischer N., Pokrovski B.G. et al.* Geochemistry of the volcano-hydrothermal system of El Chichón Volcano, Chiapas, Mexico // *Bulletin of Volcanology* 1998. V. 59. № 6. P. 436–449.
- Taran Y.A., Inguaggiato S., Varley N.B. et al.* Helium and carbon isotopes in thermal waters of the Jalisco Block, Mexico // *Geofisica International*. 2002. V. 41. № 4. P. 459–466.

ТАРАН и др.

**KIREUNSKIE AND DVUKHYURTOCHNYE SPRINGS
OF THE SREDINNY RANGE IN KAMCHATKA:
GEOLOGY, GEOCHEMISTRY AND GEOTHERMY**

Yu.A. Taran^{1,2}, L.M. Yurova¹, V.L. Leonov¹, T.P. Kirsanova¹, V.E. Kirichenko³

¹*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006*

²*Institute of Geophysics, National University of Mexico, Coyoacan, 04510, Mexico, Mexico, 04510*

³*Kamchatkan branch of the Pacific institute of geography FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006*

Kireunskie and Dvukhyurtochnye thermal springs situated within 15 km one from another at the flanks of the Sredinny Range of Kamchatka have been the object of studies during many years for their using for geothermal and therapeutic proposes. In this paper we generalize the literature and our own data on hydrogeology, geochemistry and geothermal potential of the springs based on the geological mapping, chemical and isotopic analyses and measurements of the flow rates of thermal waters. A large set of isotopic data including analyses of stable isotopes and Tritium in waters, as well as $^3\text{He}/^4\text{He}$ and N_2/Ar in gases of the springs, allowed estimating the flow paths of waters at depth. A conceptual model of this geothermal area is proposed, which explains the similarities and differences of these two hydrothermal systems.

Keywords: Kireunskie and Dvukhyurtochnye thermal springs, Kamchatka, stable isotopic, Tritium.

Поступила в редакцию 05.06.2020 г.

После доработки 23.07.2020 г.

Принята в печать 30.07.2020 г.