

УДК 551.23

## ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОД И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕРХНЕ-ЮРЬЕВСКИХ ТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ (о. ПАРАМУШИР, КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА)

© 2013 Е.Г. Калачева, Т.А. Котенко

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, 683006;  
e-mail: keg@kscnet.ru*

Приведены новые данные по макро- и микрокомпонентному составу термальных вод, разгружающихся в бассейне р. Юрьевой (о. Парамушир, Северные Курильские острова). Прослежены изменения в химическом составе и физико-химических показателей вод Верхне-Юрьевских источников, произошедшие с начала их исследований в 1957 г. до 2010 г. Дана предварительная оценка геохимической работы источников по состоянию на 2010 г. Рассмотрены условия формирования термальных вод.

*Ключевые слова: река Юрьева, Парамушир, гидрогеохимия, термальные воды, Курильские острова.*

### ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования является бассейн р. Юрьева, расположенный на о. Парамушир, одном из наиболее крупных островов Курильской гряды (рис. 1). Река Юрьева является одной из рек, дренирующих западный склон хребта Вернадского, который протягивается в субмеридиональном направлении в северной части острова (рис. 2б). В узкой долине реки, на пересечении разрывных нарушений северо-западного простирания с кольцевыми структурами (рис. 1) (Леонов, 1990<sup>1</sup>) расположен крупный очаг разгрузки термальных вод, представленные Верхне-Юрьевскими термальными источниками (ВЮТИ). Центром кольцевых структур является действующий вулкан Эбеко (рис. 1), характеризующийся фреатическим типом извержений по (Новейший..., 2005) и активной газогидротермальной деятельностью. Конус вулкана Эбеко сложен преимущественно грубообломочной пирокластикой, а его лавы представлены пироксеновыми андезибазальтами и андезитами (Новейший..., 2005). В целом, исследуемый район сложен также лавовыми отложениями андезитов и андезибазальтов ( $N^2_2-Q_1$ ) (рис. 1).

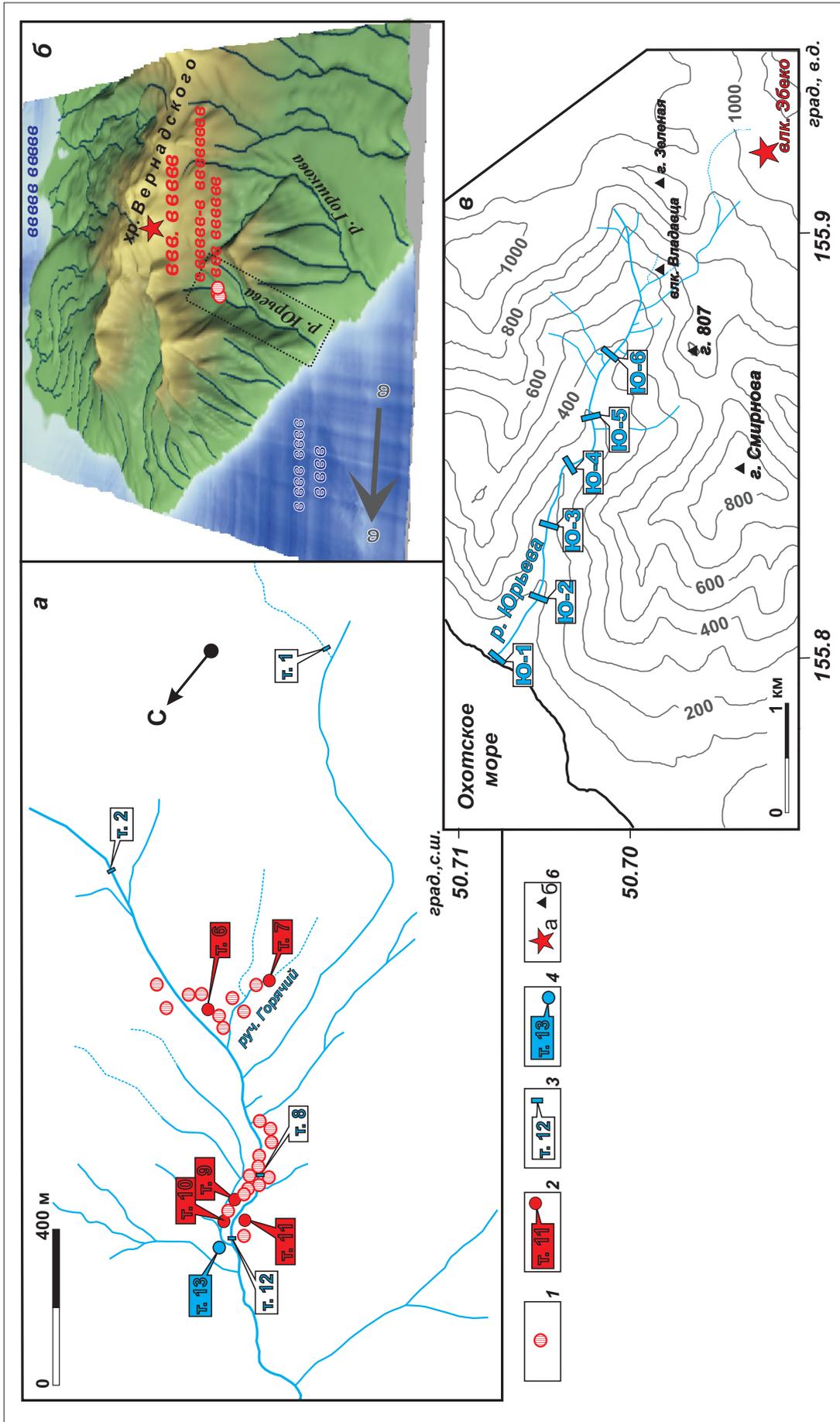
<sup>1</sup>Леонов В.Л. Оценка перспективности района г. Северо-Курильска на термальные воды // Отчет. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии, 1990. 33 с.

### КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ И ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЮТИ

Протяженность очага разгрузки термальных вод в долине р. Юрьева составляет около 700 м. По состоянию на сентябрь 2010 г. здесь насчитывалось около 30 выходов с дебитами от 0.1 до 10 л/с (рис. 2). Разгрузка термальных вод происходит из трещин в измененных лавах непосредственно в русле реки и на ее левом берегу, а также из пирокластических отложений на расстоянии от 5 до 20 м от русла. У выходов некоторых источников наблюдаются отложения коллоидной серы. Руслу термальных ручьев, формирующихся на некотором удалении от реки, покрыты ярко зелеными термофильными водорослями.

Систематическое исследование термальных источников, разгружающихся в долине р. Юрьева началось в 50-х годах прошлого века. Описание основных термопроявлений, их химический состав и отражение в классификациях термальных вод вулканических областей представлены в работах (Иванов, 1957; Мархинин, Стратула, 1977; Сидоров, 1966; Фазлуллин, 1999). Условия поступления и выноса химических элементов в бассейне реки и вопросы создания геохимической модели зоны смешения кислых речных вод с морской водой рассмотрены в работах (Борисенков, 1967; Зеленов и др., 1965; Никитина, 1968; Фазлуллин, 2000 и др.). Микрокомпонентный





**Рис. 2.** Схема расположения основных выходов термальных вод и точки опробования Примечание: а – схема расположения Верхне-Юрьевских источников; б – местоположение р.Юрьевой в северной части о. Парамушир; в – схема расположения точек опробования речных вод. 1 – основные выходы термальных вод, 2 – точки опробования термальных источников, 3 – точки опробования холодных грунтовых вод, 4 – точка опробования холодных грунтовых вод, 5 вулканы: а) действующий; б) потухшие.

ВЮТИ приурочены к самостоятельному вулканическому центру, которому было присвоено имя профессора В.И. Влодавца. Постройка вулкана Влодавца была сформирована в среднем плейстоцене, а в последующие периоды оледенения была сильно разрушена ледниками. В настоящее время центральная часть вулкана представляет собой крупную (диаметром до 2 км), открытую в западном направлении эрозионную котловину, в которой берет начало р. Юрьева. Выходы термальных вод сосредоточены в прижерловой части вулкана (рис. 1) в зоне контакта разрушенного нека с осветленными вмещающими породами (Мархинин, Стратула, 1977; Сидоров, 1966).

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА РАБОТ

Опробование вод р. Юрьева и ВЮТИ проводилось в летне-осеннюю межень в 2003, 2005 и 2010 гг. В точках отбора проб с помощью портативных мультипараметровых анализаторов WATER TEST и Multi 340i/SET немецкой фирмы WTW измерялись физико-химические параметры воды (рН, Eh, и температура, °С). Для отделения растворенной части и тонких коллоидов от взвеси пробы воды фильтровались на месте отбора через мембранный фильтр 0.45 м. Для последующего общего химического анализа водные пробы помещались в специальную пластиковую тару объемом 0.5 л, а для анализа микрокомпонентов – в отдельные контейнеры объемом 15 мл с подкислением сверхчистой HNO<sub>3</sub> до рН = 2.

Общий химический анализ, включающий определение ионов NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>, проводился в аналитическом центре Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский) потенциометрическим, объемным, колориметрическим и атомно-абсорбционным методами. Анализ микроэлементов широкого спектра выполнялся в аналитическом центре Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск) методом индуктивной плазменной масс-спектрометрии (ICP-MS) на приборе Plasma Quad.

Обработка гидрогеохимических данных, расчет глубинных температур и графическое отображение химического состава термальных вод проводились с помощью компьютерной программы AQUACHEM 5.1 (AquaChim..., 2006).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

**Химический состав термальных вод.** Как неоднократно указывалось различными ис-

следователями, воды ВЮТИ высокотемпературные (42.0-85.5 °С), высокоминерализованные (до 14 г/л), ультракислые (рН < 2). Следует отметить, что за весь период с 1957 по 2010 гг. изучения ВЮТИ различными исследователями существенных изменений, как в расположении основных выходов термальных вод, так и в общем химическом составе отдельных групп источников не произошло. Данные, полученные авторами по результатам аналитических исследований (табл. 1), подтверждают ранее опубликованные материалы. Так же, как отмечалось в работах (Никитина, 1978; Фазлуллин, 1999), нами определено, что наивысшие температуры (68-87 °С), низкие значения рН (до 1.26) и максимальные концентрации SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HSO<sub>4</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> (2-3 г/л) отмечаются в источниках, выходы которых приурочены к трещиноватым лавам (рис. 2, т. 7, т. 9, т. 11). Для них характерна и максимальная минерализация воды (до 13 г/л). Источники, разгружающиеся из рыхлых обломочных отложений (т. 6, т. 10), имеют среднюю температуру 23-48 °С, меньшее количество растворенных солей (M < 8 г/л) и более высокие значения рН. По составу основных анионов и катионов все изученные термопроявления близки между собой. Среди анионов преобладают серосодержащие ионы (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> и HSO<sub>4</sub><sup>-</sup>) и Cl<sup>-</sup>. Основными компонентами катионной части являются Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>. Значительное количество (до 77 мг/л) в воде водородных ионов – гидроксония (H<sup>+</sup>) определяют гидрохимический тип вод как водородно-алюминиевый (алюминиево-водородный) сульфатно-хлоридный (хлоридно-сульфатный) (табл. 1). Холодные грунтовые воды, разгружающиеся по бортам р. Юрьева в непосредственной близости от выходов термальных вод, имеют похожий с термами состав при более высоком соотношении SO<sub>4</sub>/Cl (рис. 2, т. 13). Эти воды имеют общую минерализацию 303 мг/л и рН = 3.3.

Помимо общего химического состава большой интерес представляют данные по микрокомпонентному составу вод ВЮТИ (табл. 2). Из группы сидерофильных элементов, помимо железа, концентрации которого позволяет отнести его к макрокомпонентам, в водах источников обнаружены Ni, Co, Mo, Cu, Cr. Во всех опробованных источниках определено высокое содержание Cr (0.2-0.3 мг/л), тогда как количество остальных элементов на 1-2 порядка меньше. Среди определенных халькофильных элементов в исследуемых водах максимальные концентрации характерны для As, Pb, Zn (табл. 2). В некоторых источниках количество Zn превышает 1 мг/л, при средних значениях в 0.5-0.7 мг/л. Концентрации As и Pb находятся в диапазоне 0.1-0.6 мг/л. Содержания других элементов этой группы (Cd, Cu, Tl, Sn, Sb) в термальных водах не превышают первого

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОД

Таблица 1. Химический состав термальных и поверхностных вод бассейна р. Юрьевой (по состоянию на сентябрь 2010 г.), мг/л.

	р. Юрьева			Термальные источники						Фоновые воды	
	т. 2	т. 8	т. 12	т. 6	т. 7 (Источник №1)	т. 9	т. 10	т. 11	т. 13		
	Исток	В центре разгрузки	Ниже термальной разгрузки								
pH <sub>lab</sub>	3.82	1.53	1.57	1.76	1.27	1.53	2.12	1.66	3.48		
Температура, °С	8.00	48.40	44.30	42.80	87.40	64.80	23.70	57.80	7.50		
Еh	+167	+350	+341	+330	+410	+373	+276	+352	+149		
Cl <sup>-</sup>	9.93	1950.30	1985.80	1267.70	3439.60	2269.40	726.93	2021.20	18.44		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	115.30	2316.00	3513.87	2097.95	3228.58	3047.98	1497.58	3046.06	122.96		
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>		1930.68	719.71	1179.74	3920.80	2259.19	428.36	1677.30	2.04		
F <sup>-</sup>	<0.1	1.52	1.52	6.80	5.76	0.76	1.90	0.56	<0.1		
H <sup>+</sup>	0.16	37.17	33.89	21.65	76.30	36.71	9.22	27.25	0.36		
Na <sup>+</sup>	8.24	195.50	195.50	157.17	296.90	238.36	80.50	206.99	10.35		
K <sup>+</sup>	2.00	99.60	104.20	92.00	147.20	135.00	49.80	118.00	3.43		
Ca <sup>2+</sup>	18.04	320.64	296.59	224.45	480.96	416.83	128.26	376.75	20.04		
Mg <sup>2+</sup>	9.73	199.42	150.78	111.14	9.00	131.33	60.80	175.10	12.16		
Fe <sup>2+</sup>	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	337.89	228.97	<0.05	39.10	<0.05		
Fe <sup>3+</sup>	<0.05	192.70	215.00	134.00	11.17	8.38	89.40	184.30	<0.05		
Al <sup>3+</sup>	1.58	308.26	369.10	304.30	521.70	508.00	207.71	476.30	18.52		
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	<0.5	24.73	37.09	12.36	54.40	39.56	13.60	39.56	<0.5		
H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> общ.	63.56	355.40	374.60	285.80	550.60	435.60	222.60	395.00	94.52		
Минерализация	228.54	7931.92	7997.65	5895.06	13080.86	9756.07	3516.66	8783.47	302.86		

Примечание: Анализ водных проб выполнен в АЦ ИВиС ДВО РАН. Аналитик А.А. Кузьмина.

Таблица 2. Микрокомпонентный состав природных вод бассейна р. Юрьевой, мкг/л.

Элемент	ВЮ-источники			р. Юрьева		ручей Горячий	Снег, т. 1
	т. 7 Источник № 1	т. 11	т. 9				
				т. 12	т. 2		
As	810.37	229.21	662.81	426.35	0.15	11.12	0.27
Ba	120.84	31.16	110.16	64.24	9.53	37.96	20.01
Cd	6.43	3.27	9.08	6.50	0.15	1.78	1.11
Co	9.72	7.66	8.43	9.35	2.47	12.21	10.92
Cr	251.39	100.81	234.94	156.64	22.49	34.40	28.15
Cu	12.76	11.27	3.10	24.82	9.03	55.45	77.35
Ga	143.70	72.72	166.91	105.57	0.61	11.02	1.41
Ge	38.64	17.79	39.06	25.04	0.27	3.59	0.58
Mn	9110.93	3732.68	8200.84	5281.21	291.04	902.07	180.13
Mo	0.45	0.00	0.75	0.37	0.22	0.26	0.28
Ni	40.92	21.15	33.46	26.49	11.32	15.66	17.75
Pb	389.25	111.51	333.22	210.38	2.22	13.32	2.83
Sc	130.55	69.28	131.51	85.61	4.64	13.54	6.07
Sr	1985.81	1355.34	2290.76	1697.95	47.91	189.14	29.90
Ti	74.24	39.98	108.26	107.35	18.18	24.96	19.51
Zn	1469.38	735.16	1402.93	986.97	86.06	304.55	137.94
Zr	8.19	0.74	4.49	2.70	0.53	0.38	0.46
Li	169.30	123.55	165.34	129.84	12.90	7.44	14.61
Rb	185.05	97.67	186.64	113.42	14.93	2.93	1.47
Cs	10.12	4.75	10.40	6.36	0.57	0.09	0.05
Be	3.26	1.86	2.76	1.68	0.44	0.05	0.09
Sn	16.35	0.75	0.72	0.57	0.78	0.39	0.26
Sb	0.35	0.18	0.19	0.16	0.06	0.07	0.02
Tl	42.83	10.74	24.91	16.69	1.75	0.12	0.33

Примечание: Анализ водных проб выполнен в АЦ ИГ СО РАН, г. Иркутск.

десятка мкг/л. Литофильные микроэлементы в малых концентрациях широко распространены в исследуемых термах. Содержания Li, Rb, Sc, Ga, Ti, Ba не превышают 100 мкг/л, среднее количество Cs, Ge, Be, Zr составляет 1-30 мкг/л. Соотношение Li/Cs в водах ВЮТИ составляет в среднем 17, что соответствует данным, представленным в работе (Арсанова, 1974). Сравнительный анализ полученных данных с обобщенными данными представленными в статье (Бортникова и др., 2006) выявил хорошую сходимость результатов этих работ.

**Изменение химического состава термальных вод во времени.** С начала исследования ВЮТИ накоплен массив данных по их химическому составу. Сравнительный анализ гидрохимических данных за длительный период наблюдения может помочь выявить особенности в общей изменчивости компонентного состава ВЮТИ. Наиболее длительный ряд наблюдений за изменением химического состава термальных вод и условий их разгрузки сформировался по результатам опробований источника (рис. 2, т. 7), расположенного в уступе русла («сухого» в летне-осеннюю межень) левого истока ручья Горячего,

получившего название «Источник № 1» (Опыт..., 1966). Разгрузка термальных вод осуществляется из трещины в гидротермально-измененных породах и сопровождается осаждением коллоидной серы, формирующей желтый налет на камнях вниз по течению ручья. В результате сравнений наших наблюдений с литературными данными разных лет (Зеленов, 1972; Иванов, 1957; Никитина, 1978; Фазлуллин, 1999) можно сделать вывод, что принципиальных изменений в условиях разгрузки «Источника № 1» не произошло. Однако химический состав и физико-химические показатели воды претерпели некоторые изменения. Так температура воды в период с 1957 по 1961 гг. составляла 92-94 °С, а начиная с 1968 г. стабильно держится в интервале 84-86 °С. Существенно уменьшился дебит источника. В сентябре 1957 г. он был оценен в 10-12 л/с, в августе-сентябре в период с 1960 по 1969 гг. – 7-9 л/с, а в 2005, 2010 гг. в этот же период по нашим наблюдениям – 2.5-3 л/с. Значительное уменьшение дебита источника в XXI веке может быть связано, как с изменением гидрохимического режима источника, так и с влиянием человеческого фактора (различия в методах определения дебита источника).

На фоне значительного уменьшения дебита наблюдаются и изменения в химическом составе вод источника. В результате сравнительного анализа химического состава воды термального источника за весь период наблюдения, представленного в виде графиков изменения концентраций отдельных компонентов во времени (рис. 3) выявлено, что отмечается значительное колебание общего количества растворенных солей и кислот в термальных водах источника в различные годы. Так в 1957 г. минерализация воды достигала 20.6 г/л, тогда как в 1988 г. ее значение составило всего 7.4 г/л. Значительное снижение минерализации обусловлено, в основном, падением концентраций в растворе сульфатсодержащих ионов ( $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{HSO}_4^-$ ) и хлор-ионов. По сравнению с 1959 г. в 1988 г. общее количество серосодержащих анионов ( $\text{SO}_4^{2-} + \text{HSO}_4^-$ ) в воде уменьшилось почти в три раза (рис. 3). Концентрация  $\text{Cl}^-$  понизилась с 4.3 до 1.6 г/л. Для катионного состава в указанный период также отмечается тенденция к снижению концентраций кальция, магния, натрия, алюминия и общего железа. Падение концентраций  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  в полтора раза в термальных водах в период с 1961 по 1969 гг. на примере других источников ранее отмечалось в работе (Никитина, 1978) и связывалось автором с ослаблением поступления глубинного пара в связи с активизацией вулкана Эбеко и последую-

щими газо-гидротермальными извержениями в период с 1963 по 1970 гг.

Не смотря на довольно ограниченный ряд данных по химическому составу термальных вод, состоящий из эпизодических замеров, мы попытались сопоставить эти данные с периодами активизации вулкана Эбеко (рис. 3). По итогам сравнительного анализа можно сделать предположение, что прямой зависимости между ВЮТИ и извержениями вулкана Эбеко, вероятнее всего, нет. Как указывалось ранее, уменьшение концентраций макрокомпонентов отмечается и в 1984 г., и в 1988 г., тогда как период усиления вулканической активности произошел осенью 1987 г. (Новейший..., 2005) и продолжался до 1991 гг.

Опробование 2005 г. проводилось нами также на фоне активизации вулкана Эбеко (Котенко и др., 2007), и в этот период, наоборот, зафиксировано увеличение концентраций макрокомпонентов в термальных водах (рис. 3), продолжающийся и в 2010 г. При этом количество ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Na}^+$  возросло до уровня значений, характерных для начальной стадии наблюдения за химическим составом термальных вод источника.

Несмотря на выявленные колебания химического состава вод «Источника № 1», опробованного в различные годы, изменений

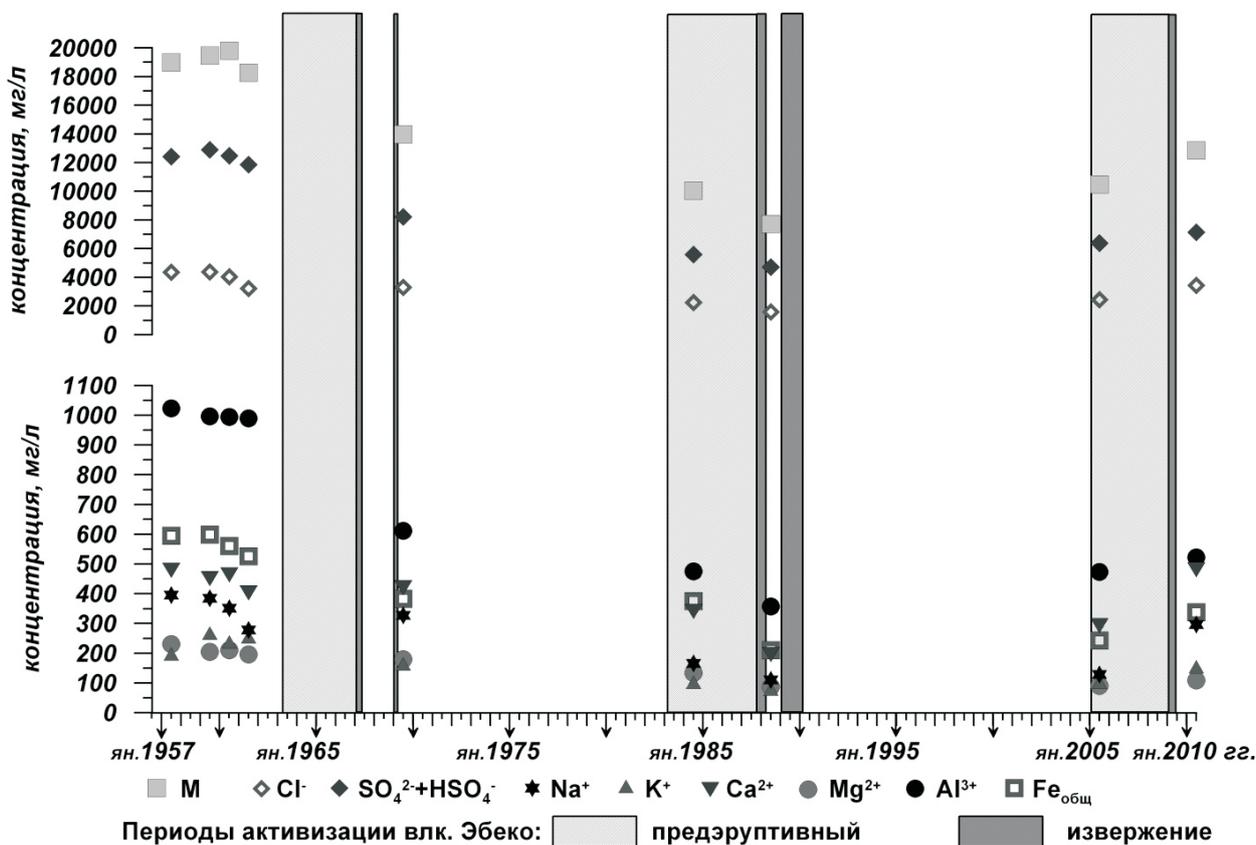


Рис. 3. Графики изменения химического состава термальных вод с 1957 по 2010 гг.

в соотношениях макрокомпонентов в ВЮТИ в целом не обнаружено. Сравнительный анализ полей значений и отдельных точек, отражающих соотношения концентраций (в мг/л) основных катионов и анионов в водах ВЮТИ показал, что все точки формируют единую область значений, указывающую на постоянство соотношений макрокатионов и анионов в термальных водах в течение всего периода наблюдений (рис. 4).

**Вынос растворенных веществ термальными водами.** Вынос растворенного вещества в океан водами р. Юрьева неоднократно рассматривался различными исследователями (Зеленов, 1972; Никитина, 1978; Фазлуллин, 1999). При этом проводимые расчеты основывались на данных о химическом составе и дебите реки у впадения ее в Охотское море. В результате получались данные о геохимической работе реки в целом, включая и термальную составляющую. Нами впервые предпринята попытка определения выноса растворенных веществ непосредственно термальными источниками. Для этого были выполнены гидрометрические замеры и опробование вод р. Юрьева выше и ниже разгрузки термальных вод, благодаря которым была исключена минеральная нагрузка, характерная для реки до попадания в нее термальных вод. Исходя из концентраций макро и микрокомпонентов, поступающих в р. Юрьева с термальными водами, были проведены расчеты по ежесуточному выносу растворенных веществ всей группой ВЮТИ по состоянию на сентябрь 2005 года и «Источником № 1» за различные года (табл. 3). Измеренный общий дебит термальных вод, разгружающихся в долине р. Юрьева, равен 170 л/с. Общая масса растворенных веществ, выносимых на поверхность с термальными водами ежесуточно, составляет около

100 т, из них на долю  $\text{Cl}$  приходится 29 т,  $\text{SO}_4$  - 50 т,  $\text{SiO}_2$  - 2.7 т. Вынос алюминия составляет 5.4 т/сутки, железа - 3.2 т, кальция - 4 т. Количество микроэлементов, выводимых на поверхность ВЮТИ, достигает 115 кг/сутки. Ежедневно выносятся более 64 кг марганца, 22 кг стронция, 10 кг цинка, 6 кг мышьяка и 2 кг свинца. В связи с отсутствием данных, нет возможности сравнить геохимический вклад термальных вод всей группы ВЮТИ, рассчитанный по результатам наших исследований, с предыдущими годами. Сравнительный анализ результатов расчетов по выносу растворенного вещества термальными водами «Источника №1» показал ослабление поступления всех основных компонентов (табл. 3) за счет уменьшения дебита источника и за счет изменения химического состава воды.

**Условия формирования термальных вод.** То, что формирование ультракислых термальных вод, подобных тем, что разгружаются в долине р. Юрьева может происходить только в областях активного вулканизма не вызывает сомнения. Однако приуроченность ВЮТИ к постройке вулкана Влодавца привела некоторых исследователей (Воронова, Сидоров, 1966; Мархинин, Стратула, 1977; Родионова и др., 1966 и др.) к мнению, что и генетически они связаны с данным вулканом. По мнению (Воронова, Сидоров, 1966, с. 150) «...диффундирующие к поверхности вулканические эманации вулкана Влодавца перехватываются мощным потоком грунтовых вод с образованием в основании фумарольного поля высокотемпературных Верхне-Юрьевских источников с ультракислой, богатой ионами  $\text{Cl}$  водой». Основанием для подобного вывода послужила слабо выраженная сольфатарная деятельность вулкана в виде небольшого участка

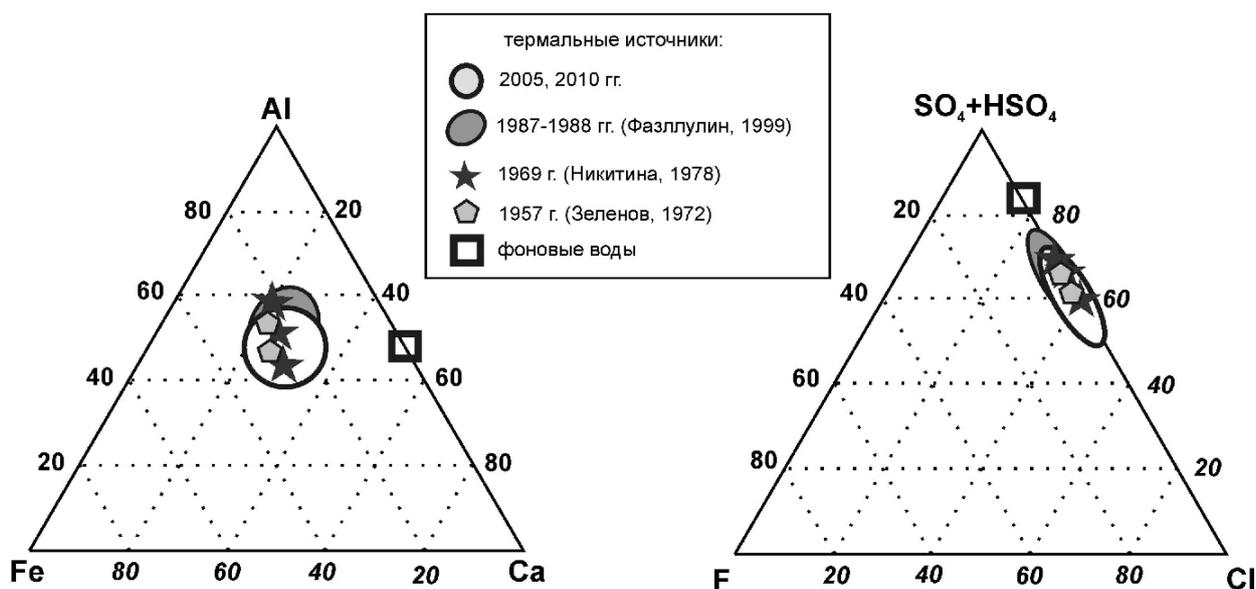


Рис. 4. Соотношения макрокомпонентов в термальных водах в различные годы по литературным источникам и оригинальным данным.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОД

Таблица 3. Ежесуточный вынос растворенного вещества ВЮТИ, кг.

Растворенное вещество	Общий вынос термальными водами (по данным 2005 г.)	Вынос растворенного вещества одним источником (Источник № 1)		
		1960 г.	1969 г.	2010 г.
	Q = 170 л/с	Q = 8 л/с	Q = 8 л/с	Q = 2.5 л/с
Cl	29022	2794	2284	743
SO <sub>4</sub>	49918	8628	2932	697
HSO <sub>4</sub>	10571		2752	847
F	22	55	8	1.2
Na	2750	243	226	64
K	1501	159	108	32
Ca	4091	320	291	104
Mg	2072	145	124	1.9
Fe <sub>общ</sub>	3158	320	265	75
Al	5398	687	423	113
SiO <sub>2</sub>	2741	209	187	71
Mn	73.30	Примечание: вынос вещества Источником № 1 за 1960 г. пересчитан по данным К.К. Зеленова (1972), за 1969 г. – по данным Л.П. Никитиной (1978)		
Sr	24.24			
Zn	13.23			
Pb	3.06			
As	6.26			
Sc	1.19			
Ti	1.31			
Cr	1.97			
Li	1.80			
Rb	1.62			
Cs	0.09			
Ba	0.80			
Ni	0.22			
Cu	0.23			
Ga	1.54			
Ge	0.36			
Zr	0.03			
Cd	0.09			
Tl	0.24			
Co	0.10			

с выходами низкотемпературных (96 °С) парогазовых струй в прижерловой части. Химический состав фумарольного газа и его конденсата представлен в работах (Воронова, Сидоров, 1966; Родионова и др., 1966). В более поздних публикациях упоминаний о парогазовых выходах в прижерловой части вулкана Влодавцы нет. В ходе полевых работ 2005 и 2010 гг. при детальном обследовании исследуемого района признаков современной сольфатарной деятельности нами также обнаружено не было.

В большей же части публикаций, посвященных исследуемым водам, многочисленные

авторы ассоциируют ВЮТИ с вулканом Эбеко, считая их одним из проявлений современной газогидротермальной деятельности вулкана (Бортникова и др., 2006; Никитина, 1978; Фазлулин, 1999 и др.) Основопологающей работой в этом направлении исследований стала статья В.В. Иванова (1957, с. 72-73), в которой автор вынес определение ВЮТИ как фумарольным термам «глубинного» формирования, питание которых происходит «... трещинными, относительно глубокой циркуляции водами, формирующимися в вулканических породах, в недрах вулкана Эбеко, под воздействием его высоко-

температурных газовых выделений». «Глубокий каньон р. Юрьева создает благоприятные условия для образования крупного очага разгрузки высокотемпературных содержащих свободные кислоты терм, циркулирующих на глубине по периферии вулкана Эбеко». В дальнейшем, при рассмотрении условий формирования термальных вод некоторые исследователи (Никитина, 1978; Фазлуллин, 1999) ограничивались определением, предложенным В.В. Ивановым. В работе (Бортникова и др., 2006, с. 47), на основе корреляционного анализа геохимических данных, дано определение о том, что формирование ВЮТИ происходит за счет «...поступления существенно большей доли глубинного флюида в хорошо проработанные каналы. Компактное расположение точек составов и горячих и теплых источников свидетельствует о хорошей проработке путей их выходов на дневную поверхность».

Однако, если за основу взять тот факт, что именно в результате смешения магматических эманаций вулкана Эбеко с подземными водами происходит формирование термальных вод, разгружающихся в долине р. Юрьева, необходимо более детально рассмотреть вопросы, на которые до сих пор не было дано ответа: где, на какой глубине и при какой температуре происходит формирование гидротерм, разгружающихся на поверхности в виде ВЮТИ?

**Генезис термальных вод.** В работе (Arribas et al., 2000) предложена модель формирования кислых терм в области активного вулканизма. Авторами указывается, что существуют три типа вод, содержащих природные кислоты:

- гипогенные магматические конденсаты (гидрохлоридно-сернистые кислые гидротермы с  $pH \sim 1$ );
- окисленные паром нагретые гидротермы (сульфатно-кислые гидротермы с  $pH \sim 2-3$ );
- супергенные окисленные воды.

Формирование первого типа вод происходит в результате процессов диссоциации доминирующих гипогенных кислых соединений  $HCl$  и  $H_2SO_4$  при температурах от  $< 300$  °С до  $350$  °С с последующей частичной адсорбцией высокотемпературных магматических летучих компонентов подземными водами и перераспределение атомов в соединениях  $SO_2$ . Гипогенные магматические конденсаты редко выходят на поверхность в виде источников непосредственно над областью формирования (Arribas et al., 2000). Это связано с тем, что высокоминерализованные воды не могут формировать самостоятельно восходящие потоки. Для подъема на поверхность им необходима движущая сила (газ). Однако, при благоприятных геологических условиях, наличии проницаемых горизонтов вмещающих пород, гидротермы образуют латеральные потоки,

движение которых направлено в сторону падения гидравлического градиента. В таком случае гипогенные термальные воды выходят на поверхность в виде горячих источников гипсометрически ниже, чем расположена область формирования вод. Низкие значения  $pH$ , высокие концентрации  $H^+$ ,  $Al^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $F^-$  в составе термальных вод, разгружающихся в бассейне р. Юрьева, позволяют отнести их к этому типу вод. Крайне низкая газонасыщенность и температуры воды менее  $100$  °С на выходе указывают на наличие подобного латерального потока в исследуемом районе. Следовательно, если ВЮТИ расположены на высоте  $500-550$  м над уровнем моря, то область формирования гидротерм находится гипсометрически выше, вероятнее всего в привершинной части вулкана Эбеко. Это косвенно подтверждается и геофизическими исследованиями (Панин и др., 2010), в результате которых на одном из фумарольных полей вулкана на глубине до  $40$  м подсечена верхняя граница области распространения высокоминерализованных вод. Специфические климатические условия, характерные для прикратерной части вулкана, обеспечивают постоянное водное питание горизонта, где происходит формирование гипогенных терм, а структурные, стратиграфические и топографические особенности вулкана Эбеко определяют ограниченный сток в северо-западном направлении. Вероятнее всего, один из горизонтов горизонт крупнообломочных проницаемых лав, распространенных в этом районе формируют гидравлический канал между областями формирования и разгрузки термальных вод.

**Температурные условия формирования термальных вод.** Для предварительных оценок глубинных температур, при которых происходит формирование различных типов термальных вод, применяются ионно-солевые геотермометры, рассмотренные в работах (Giggebach, 1988; Kharaka, Mariner, 1989). Нами для расчетов были использованы только кремневые (кварцевый и халцедоновый) геотермометры при адиабатическом охлаждении их горячеводной составляющей (табл. 4). Применение  $Na/K$  геотермометров в случае изучения термальных вод, подобно исследуемым некорректно, поскольку ультракислые воды не являются насыщенными по отношению к натрию и калию по (Giggebach, 1988).

Следует отметить, рассчитанные температуры для термальных вод напрямую зависят от количества растворенной кремнекислоты в их составе, чем больше концентрация  $H_4SiO_4$ , тем выше температуры. При этом необходимо учесть, что в результате смешения термальных вод с грунтовыми в процессе движения от области формирования к области разгрузки происходит осаждение кварца и его модификаций из рас-

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОД

Таблица 4. Измеренные и рассчитанные глубинные температуры термальных вод.

Точка отбора пробы	T, °C, изм.	SiO <sub>2</sub> кварц	SiO <sub>2</sub> халцедон
		F	A
т. 11	56	192	188
т. 6	43	170	163
т. 7	87.4	217	216
т. 9	64.8	199	196

Примечание: авторы геотермометров: F – Фурнье, А – Арнорссон, данные из работы (Inguaggiato et al., 2000).

твора, и конечное количество растворенной кремниевой кислоты в точках опробования меньше, чем в гидротермах. Наибольшее количество растворенной кремниевой кислоты определено в т. 7 («Источник № 1»). Соответственно, расчетные глубинные температуры для этого источника имеют более высокие, по сравнению с другими, значения, достигающие 217 °C. По данным (Giggenbach, 1997; Hedenquist, 1995) формирование гипогенных терм, подобных исследуемым, происходит при температурах от 200 до 250 °C.

**Влияние термальных вод на химический состав р. Юрьева.** Река Юрьева, дренирующая термальное поле, на котором расположены ВЮТИ берет начало в циркулярном распаде на высоте 600 м. Площадь водосбора ее составляет 9.22 км<sup>2</sup>, протяженность реки 4.3 км. Общее падение реки 550 м, а средний уклон составляет 0.13. Модуль речного стока 99.89 л·с/км<sup>2</sup>. Согласно водно-

балансовым расчетам, для бассейна р. Юрьева характерно преобладание отрицательного приращения инфильтрации за счет выходов подземных вод и обильных атмосферных осадков в течение всего года (Калачева, 2008). Расход реки в устье в летне-осеннюю межень составляет 0.86 м<sup>3</sup>/сек (по данным замеров 2003, 2005 и 2010 гг.). Выше выходов терм, вода реки имеет минерализацию 228 мг/л и температуру 8 °C, слабокислую реакцию (pH = 4.06). В составе воды среди катионов преобладает Ca<sup>2+</sup>, среди анионов – SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (табл. 1). Дебит реки на этом участке составляет 15 л/с. По мере поступления в основное русло термальных и холодных кислых вод происходит трансформация химического состава и основных физико-химических показателей речных вод. Воды реки приобретают схожий с разгружающимися термами химический состав (табл. 1). На рис. 5, на основе данных опробования, проведен-

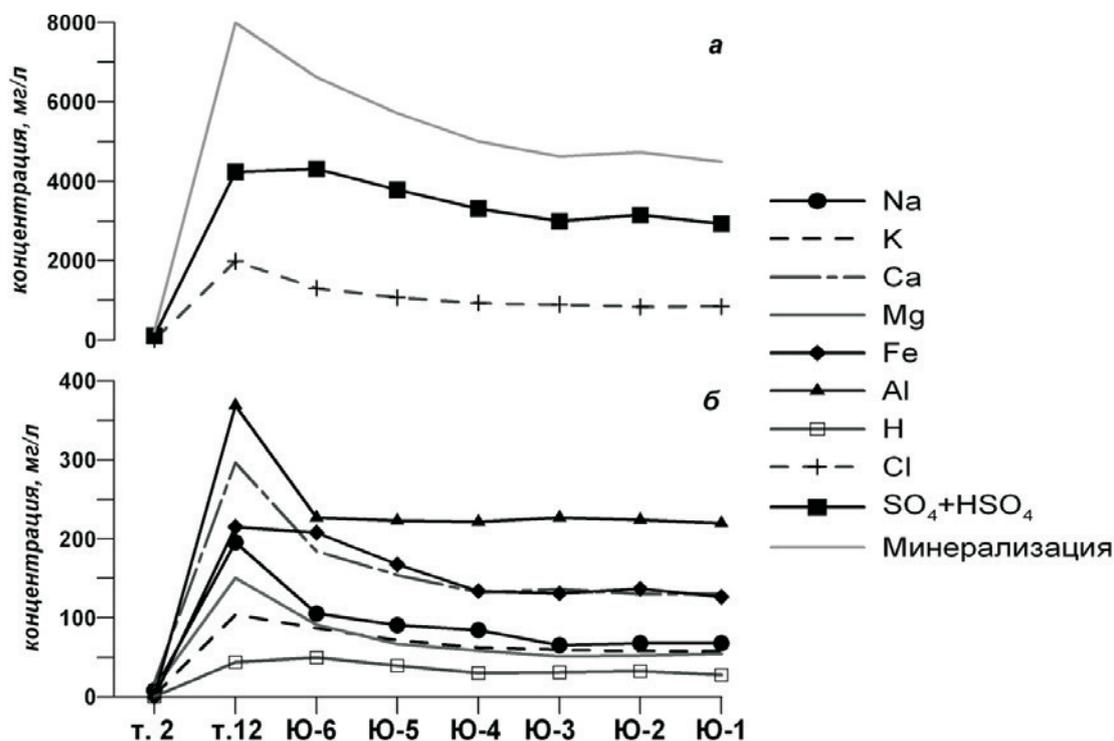


Рис. 5. Графики изменения химического состава вод р. Юрьевой: а – минерализация и основные анионы; б – макрокатионы. Точки отбора показаны на рис. 2а и 2в.

ных в 2003 и 2010 гг. показано перераспределение макрокомпонентов в речных водах от истока р. Юрьевна до устья. Если выше ВЮТИ в катионной части речных вод преобладали  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  (табл. 1), то в зоне разгрузки и далее до устья основную роль играет  $\text{Al}^{3+}$  (рис. 5б). В анионной части на всем протяжении реки преобладает  $\text{SO}_4^{2-}$ . Резкое увеличение минерализации воды ниже разгрузки терм до 8 г/л далее по руслу сменяется плавным падением (до 4 г/л) в основном, за счет уменьшения концентрации серосодержащих анионов (рис. 5а). Температура воды в реке ниже разгрузки возрастает до 44.3 °С, а к устью уменьшается до 18 °С.

За счет поступления термальных вод в русло повышаются концентрации микроэлементов в речных водах (табл. 2). Наблюдается резкое возрастание, в 10-100 раз, концентраций всех определенных микроэлементов, за исключение элементов группы железа (Mo, Ni, Co). Истоки р. Юрьева, дренирующие гидротермально-измененные породы и талые воды, изначально содержат концентрации Co и Ni, сопоставимые с количествами, выносимыми термальными водами (табл. 2).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Верхне-Юрьевские термальные источники с разной степенью детальности исследуются уже более 50 лет. При изучении опубликованных данных авторы настоящей работы столкнулись с тем, что существуют различные мнения о морфологической привязке источников. На основе результатов геологических работ в работах (Родионова и др., 1966) показано, что выходы термальных воды, разгружающиеся в бассейне р. Юрьева сосредоточены именно в прижерловой части вулкана Влодавца. Но источником водного и теплового питания для них служит вулкан Эбеко. Неоспорим тот факт, что формирования термальных вод происходит за счет конденсации и последующего смешения вулканических эксгалаций с подземными водами, поскольку многократно различными учеными изучался процесс формирования ультракислых гидротерм, фумарольных терм «глубинного» формирования по (Иванов, 1957) или гипогенных магматических конденсатов по (Arribas et al., 2000). В отношении непосредственно ВЮТИ авторами данной работы впервые определено, что область формирования термальных вод может находиться только в прикратерной части вулкана Эбеко, на абсолютных отметках превышающих область разгрузки. Расчетная температура формирования вод составляет 217 °С. Мы считаем, в корне неверным утверждение, предложенное в работе (Иванов, 1957, с. 73), на которое часто ссылаются

авторы статей, что ВЮТИ источники являются «... очагом разгрузки ... терм, циркулирующих на глубине по периферии вулкана Эбеко». Для формирования восходящего потока необходимо наличие движущей силы, а в данном случае ее нет. Источники характеризуются крайне низкой газонасыщенностью, что отмечалось и ранее, температурами менее 100 °С, по характеру истечения исследуемые воды относятся к безнапорным, следовательно, только при наличии гидравлического канала, связывающего область формирования и область разгрузки может происходить разгрузка подобных термальных вод.

Сравнительный анализ полученных данных, по итогам полевых работ 2005 и 2010 гг. с результатами ранее проведенных исследований показал, что значительных изменений на термальном поле не произошло. Физико-химические показатели вод и их химический состав постоянны на протяжении всего периода наблюдений, с незначительными отклонениями, связанными, скорее всего, с погрешностями методов опробования, используемых приборов и т.д. Значительные изменения за прошедший период выявлены только для «Источника № 1», опробованном рядом исследователей в различные годы. Уменьшился дебит источника, концентрации макрокомпонентов в пробах воды, отобранных в различные годы, сильно варьирует. С чем связаны эти изменения, сказать пока сложно, так как ряд данных очень ограниченный, отсутствуют наблюдения за элементами климата, возможны неточности гидрологических измерений. Только ежегодные режимные наблюдения за данным источником в течении длительного периода времени помогут определить его гидрологический и гидрохимический режим.

В результате сопоставления данных по химическому составу термальных вод с периодами активизации вулкана Эбеко прямой зависимости в изменении концентраций отдельных компонентов от активности вулкана не выявлено.

Используя в расчетах общую массу и химический состав термальной воды, поступающей в р. Юрьева определено следующее: источниками выносятся ежедневно около 100 т вещества, из них на долю Cl приходится 29 т,  $\text{SO}_4$  – 50 т,  $\text{SiO}_2$  – 2.7 т. Вынос алюминия составляет 5.4 т/сутки, железа – 3.2 т, кальция – 4 т. Количество микроэлементов, выводимых на поверхность ВЮТИ, достигает 115 кг/сутки.

Авторы статьи выражают благодарность д.г.-м.н. С.Н. Рычагову за организацию Парамуширских экспедиций (2003, 2005 и 2010 гг.) и искренне признательны Л.В. Котенко за всестороннюю помощь при проведении полевых работ в бассейне р. Юрьева.

## Список литературы

- Арсанова Г.И.* Редкие щелочи в термальных водах вулканических областей. Новосибирск: Наука, 1974. 110 с.
- Атлас Сахалинской области. Хабаровск: ФГУП ДВ АГП, 2007. 107 с.
- Белоусов В.И., Рычагов С.Н., Сугробов В.М.* Северо-Парамуширская гидротермально-магматическая конвективная система: геологическое строение концептуальная модель, геотермальные ресурсы // Вулканология и сейсмология. 2002. № 1. С. 34-50.
- Борисенков В.И.* Некоторые условия миграции алюминия, железа и титана в поствулканическом и гидротермальном процессах // Литология и полезные ископаемые. 1967. № 4. С. 67-75.
- Бортникова С.Б., Бессонова Е.П., Трофимова Л.Б. и др.* Гидрогеохимия газогидротермальных источников вулкана Эбеко (о-в Парамушир) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 39-51.
- Воронова Л.Г., Сидоров С.С.* Сравнительная характеристика фумарольных газов некоторых вулканов Курильских островов // Современный вулканизм. Труды второго всесоюзного вулканологического совещания 3-17 сентября 1964 г. Том I. М.: Наука, 1966. С. 146-153.
- Зеленов К.К.* Вулканы как источники рудообразующих компонентов осадочных толщ. М.: Наука, 1972. 213 с.
- Зеленов К.К., Ткаченко Р.П., Канакина М.Л.* Перераспределение рудообразующих элементов в процессе гидротермальной деятельности вулкана Эбеко (о. Парамушир) // Труды ГИН АН СССР. Вып. 141. 1965. С. 140-167.
- Иванов В.В.* Современная гидротермальная деятельность вулкана Эбеко на острове Парамушир // Геохимия. 1957. № 1. С. 63-77.
- Калачева Е.Г.* Применение метода водного баланса для изучения условий питания подземных вод северной части о. Парамушир, Курильские острова // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 2. Вып. 12. С. 87-94.
- Котенко Т.А., Котенко Л.В.* Гидротермальные проявления и тепловой поток вулканов Эбеко и Крашенинникова (о. Парамушир, Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 1. Вып. 7. С. 129-137.
- Котенко Т.А., Котенко Л.В., Шапарь В.Н.* Активизация вулкана Эбеко в 2005-2006 гг. (о-в Парамушир, Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 3-14.
- Мархинин Е.К., Стратула Д.С.* Гидротермы Курильских островов. М.: Наука, 1977. 212 с.
- Нехорошев А.С.* Геотермические условия и тепловой поток вулкана Эбеко на острове Парамушир // Бюл. вулк. станций. 1960. № С. 38-46.
- Никитина Л.П.* Миграция металлов с активных вулканов в бассейн седиментации. М.: Наука, 1978. 80 с.
- Новейший и современный вулканизм на территории России. М.: Наука, 2005. 604 с.
- Опыт комплексного исследования района современного и новейшего вулканизма (на примере хр. Вернадского о. Парамушир) // Труды СахКНИИ СО АН СССР. Вып. 16. 1966. 206 с.
- Панин Г.Л., Котенко Т.А., Котенко Л.В., Карин Ю.Г.* Геофизико-геохимические исследования термальных полей вулкана Эбеко // Литосфера. 2010. № 3. С. 171-176.
- Родионова Р.И., Сидоров С.С., Федорченко В.И., Шилов В.Н.* Геологическое строение и современная гидротермальная деятельность вулкана Влодавца // Современный вулканизм. Труды второго всесоюзного вулканологического совещания 3-17 сентября 1964 г. Т. I. М.: Наука, 1966. С. 98-103.
- Сидоров С.С.* Термальные воды Курильских островов. // Современный вулканизм. Труды второго Всесоюзного вулканологического совещания 3-17 сентября 1964 г. Т. I. М.: Наука, 1966. С. 211-218.
- Фазлуллин С.М.* Геохимическая система р. Юрьева (Курильские о-ва): условия поступления и выноса химических элементов в бассейн реки // Вулканология и сейсмология. 1999. № 1. С. 54-67.
- Фазлуллин С.М.* Геохимическая система реки Юрьева (Курильские о-ва): геохимическая модель процесса смешения в устье // Вулканология и сейсмология. 2000. № 1. С. 36-45.
- AquaChim v.5.1. User's manual. Water Quality Data Analysis, Plotting, and Modeling. Waterloo Hydrogeologic, Inc., 2006. 366 p.
- Arribas A., Gonzalez-Urien E., Hedenquist J.W.* Exploration for epithermal gold deposits. Gold in 2000, Society of Economic Geologists Shortcourse. Tahoe, Nevada. 2000. С. 245-277.
- Giggenbach W.F.* Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators // Geochim. Cosmochim. Acta. 1988. V. 52. P. 2749-2765.
- Giggenbach W.F.* The origin and evolution of fluids in magmatic-hydrothermal systems // Geochemistry of hydrothermal ore deposits (3rd edition). New York: John Wiley, 1997. P. 737-796.
- Hedenquist J.W.* The ascent of magmatic fluids: Eruption versus mineralization. Fluids and Ore Deposits // Mineralogical Association of Canada Shortcourse, Victoria, Canada. 1995. V. 5. P. 263-289.

*Inguaggiato S., Pecoraino G., D'Amore F.* Chemical and isotopical characterization of fluid manifestations of Isshia Island (Italy) // *Journal of volcanology and geothermal research*. 2000. V. 99. P.151-178.

*Kharaka Y.K., Mariner R.H.* Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins. *Thermal History of Sedimentary Basins: Methods and Case Histories*. Berlin: Springer., 1989. P. 99-117.

## WATER GEOCHEMISTRY AND FORMATION CONDITIONS OF THE VERKHNE-YURYEVA THERMAL SPRINGS, PARAMUSHIR ISLAND

**E.G. Kalacheva, T.A. Kotenko**

*Institute of Volcanology and Seismology, Petropavlovsk-Kamchatsky*

The article presents new data on macro and micro component composition of thermal waters, which discharge in the basin of the Yuryeva River, Paramushir Island, the Northern Kuriles. The authors revealed chemical variations and physical characteristics of waters from the Verkhne-Yuryeva springs, which were registered over the period 1957-2010. The authors suggested preliminary estimations for the geochemical activity of the springs according to their condition in 2010 and studied thermal water formation conditions.

*Keywords: Yuryeva River, Paramushir Island, hydrogeochemistry, thermal water, Kurile Islands.*