

## **VIII. ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКАЯ И МЕТАСОМАТИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ В ОБЛАСТИ РАЗГРУЗКИ ГЛУБИННЫХ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ РАСТВОРОВ**

Кальдера Узон в силу своих гидрогеологических особенностей выступает как гидротермальное месторождение, на котором проявляется горизонтальная металлогеническая и метасоматическая зональность, подчиняющаяся тепловой и гидрохимической.

Горизонтальная гидрохимическая зональность в кальдере открыта и изучена Г. Ф. Пилипенко. Она хорошо согласуется с тепловой и, в основном, ею определяется. Подчиняясь гидрохимической зональности, проявляется газовая и металлогеническая зональность и, как следствие реакций раствор-порода,

метасоматическая зональность и зональность осадков из вод. Горизонтальная зональность по всем показателям проявляется от внутренней, соответствующей осевой части термоаномалии, и совпадающей с глубинной зоной разлома, к промежуточной, окаймляющей осевую, и внешней, проявляющейся по ряду площадок, в том числе по Западному и Северному термальным полям. В плане сложной тектоники месторождения при сочетании и пересечении глубинных, оперяющих и кольцевой зон разломов на термоаномалии в промежуточной и внешней зонах фиксируются окна глубинной хлоридно-натриевой воды и в различной степени проявляется влияние хлор-натриевой компоненты, что осложняет возникающую горизонтальную зональность. Особенно это относится к газовому составу термоаномалии, поскольку глубинная газовая компонента обладает большей миграционной способностью по сравнению с водой. Одновременно на горизонтальную зональность существенное влияние оказывают экзогенные процессы, особенно окислительные. Окисление свободных и иловых растворов влияет на активность реакции раствор-порода и соответственно определяет состав осадков из вод и гидротермально измененных пород. Такие процессы одновременно развиваются по всей термоаномалии, включая внутреннюю с хлоридно-натриевыми водами в участках меньшей прогретости. На горизонтальную зональность гидротермально-измененных пород существенное влияние оказывает рельеф и, соответственно, уровень зеркала термальных вод: выше его по всей термоаномалии развиваются фации сернокислотного выщелачивания, ниже - аргиллитизации и цеолитизации. В общем плане термоаномалии горизонтальная зональность выступает более отчетливо по тепловым, гидрохимическим, металлогеническим и метасоматическим показателям и менее отчетливо по газам, осадкам из вод и иловым растворам в них. Для характеристики горизонтальной зональности термоаномалии Узон нами вкрест и вдоль ее опробованы грифоны с одновременным определением состава воды, спонтанного газа, осадков из воды и иловых растворов (водных вытяжек из илов). В водах, парах и твердых продуктах реакций определялось содержание металлов. Термоаномалия была покрыта скважинами до глубины 3 м для определения характера гидротермального изменения пород.

Выходы перегретой наиболее чистой хлоридно-натриевой воды приурочены к Осевой части Центрального термального поля и имеют площадной выход через проколы. Этот участок наиболее прогрет, вода на выходах кипит с интенсивным пароотделением. Реакция воды близкая к нейтральной, минерализация около 3 г/л, хлор-натриевая компонента составляет 90 мг-экв-% и более, генетические коэффициенты приближаются к постоянным.

Площадные проколы перегретой хлоридно-натриевой воды, богатой кремнеземом, в Осевой части Центрального термального поля фиксируются гейзеритами. Для кальдеры Узон гейзериты не имеют столь широкого развития, как в других районах разгрузки подобных терм, в том числе в соседней с Узоном Долине гейзеров, что определяется гидрогеологическими условиями (обводненностью депрессии Узон), однако и здесь они типичны.

Кремнистые осадки в кальдере Узон наблюдаются в четырех формах: 1) гейзеритовые островки на поверхности площадных проколов хлоридно-натриевых вод в Осевой части Центрального термального поля; 2) небольшие гейзеритовые постройки в виде ожерелья вокруг отдельных грифонов (гейзер Ната, источник на Тростниковом участке); 3) кремнистые плиты на дне Хлоридного озера, четвертого озера и др.; 4) мучнистые кремнистые осадки на дне и стенках некоторых котлов с хлоридно-натриевой водой.

Гейзеритовые островки в осевой части Центрального поля имеют диаметр не более 30 см и возвышаются над зеркалом термальных вод на 5-10 см. С поверхности они заилены, в разрезе имеют белый и кремовый цвет, слоистые и кавернозные. Гейзерит проколов и гейзера Ната (на площадке Ожерелье) больше чем на 90% состоит из кремнезема и воды (опал+кристоболит). Примесь других породообразующих компонентов незначительная (табл. 56).

Таблица 56

**Состав осадков из вод (в вес. %)**

Компоненты	Из хлоридно-натриевых вод		Из вод смешанного состава с влиянием конденсата пара											
	Гейзериты		Кремнисто-глинистые			Кремнисто-глинисто-серные		Кремнисто-глинисто-щелочные			Кремнисто-серные			
SiO <sub>2</sub>	81,10	81,56	53,0	51,36	43,90	41,44	43,80	32,94	29,34	43,20	8,42	31,70	16,76	41,78
TiO <sub>2</sub>	0,16	0,23	1,15	1,45	1,42	0,33	0,39	0,98	0,76	0,84	0,36	0,98	0,19	1,08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,37	1,88	17,28	21,17	17,43	13,37	16,51	12,65	10,53	13,34	2,96	9,88	6,62	16,91
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,65	Н. о.	4,26	2,85	10,67	4,18	5,52	22,81	23,26	13,80	1,76	6,17	3,13	2,19
MnO	Следы	0,20	0,10	0,03	0,17	0,05	0,03	0,31	0,11	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05
MgO	0,15	Н. о.	1,18	1,55	0,11	0,06	0,42	1,53	1,07	1,18	0,08	0,13	0,43	0,76
CaO	0,65	2,64	2,34	1,08	1,66	0,94	1,19	2,14	1,82	1,97	0,52	0,82	0,70	1,02
Na <sub>2</sub> O	0,40	0,48	1,10	0,47	1,35	0,28	0,74	Следь	0,27	1,00	Следы	0,20	Следы	0,47
K <sub>2</sub> O	0,14	0,20	0,58	0,41	0,45	0,48	0,28	0,24	0,31	0,58	0,04	0,22	0,04	0,38
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	5,34	5,70	6,98	4,84	2,88	6,26	4,76	6,30	9,24	6,54	5,22	1,74	5,60	7,04
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	5,19	4,60	8,22	7,48	6,62	8,47	8,89	5,94	11,31	4,48	2,38	8,06	3,90	6,38
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,04	0,13	0,18	0,20	0,25	0,23	0,15	0,33	0,14	0,14	0,03	0,18	0,17	0,15
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,40	0,26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	1,15	0,45	2,70	1,10	0,93	2,05	2,20	0,40	—
S <sub>эл</sub>	—	—	0,85	1,38	0,90	22,98	12,09	—	2,19	1,96	73,92	36,16	53,76	15,25
SO <sub>3</sub>	—	—	—	2,55	12,65	—	—	—	—	—	—	—	—	4,28
S <sub>пр</sub>	2,98	1,65	2,60	1,75	—	—	—	8,17	6,85	3,95	—	—	—	0,45
Сорг	—	—	—	—	—	—	4,15	2,73	2,27	6,28	1,57	0,80	8,12	—
С у м м а	101,57	100,13	101,67	100,67	100,46	100,21	99,37	99,77	100,57	100,21	99,35	99,29	99,86	99,78
Поправка	1,49	—	-1,3	-0,87	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
С у м м а	100,08	—	100,37	99,80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

1 - проколы осевой части Центрального термального поля; 2 - гейзер Ната; 3 - разрез вкост осевой части Центрального термального поля (Т-I); 4, б - то же (Т-V); 6 - разрез вдоль Центрального термального поля (Т-I); 7 - то же (Т-III); г - ручей из Сизого котла; 9 - то же устье ручья; 10 - озеро Серое; 11 - Оранжевая площадка; 12 - то же; 13 - озеро Банное; 14 - поле Цепочка.

Судя по отношениям в гейзеритах Na<sub>2</sub>O:K<sub>2</sub>O, CaO:MgO, можно считать, что основное загрязнение их обусловлено частичками пород. Это относится и к титану. Абсолютные значения его в гейзеритах занижены по сравнению с породами Узона за счет преобладания в них осадочного из раствора кремнезема. Поэтому отношение SiO<sub>2</sub>:TiO<sub>2</sub> резко завышено: 354, 500- вместо 50-100 в породах; отношения же Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : TiO<sub>2</sub> и др. близки к породным. Присутствие марганца и фосфора в гейзеритах, в основном, определяется высаживанием из воды вместе с кремнеземом, серой, мышьяком и другими металлами.

Водная вытяжка из гейзерита имеет состав, близкий к основной хлоридно-натриевой воде; хлор-натриевая компонента в ней достигает 83 мг-экв- %, отношение Na:Cl (в мг-экв/л) близко к единице. Отмечается несколько повышенная сульфатность и аммонийность порового раствора, что, вероятно, обусловлено влиянием конденсирования паров хлоридно-натриевых вод в толще пористого гейзерита.

Определение кремневой кислоты в водах Узона проводилось в лабораторных условиях весовым методом. Содержание было определено в пределах 150-400 мг/л H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (рис. 93). По данным Краускопфа, приведена прямая зависимость растворимости кремнезема от температуры. Сравнение полученных данных с этой прямой показывает, что из вод нашего состава кремневая кислота не должна выпадать в осадок (рис. 94). Осаждение кремнезема из перегретых хлоридно-натриевых вод на их выходах, вероятно, определяется динамическими процессами, нарушающими равновесное состояние глубинного раствора при выходе его на поверхность земли. Основным фактором является вскипание глубинных растворов на поверхности с резким охлаждением и повышением концентрации при пароотделении (рис. 95, 96, 97).

Горизонтальная зональность прослежена по котлам вкост осевой части Центрального термального поля по западной кромке Хлоридного озера к периферии термоаномалии и вдоль его.

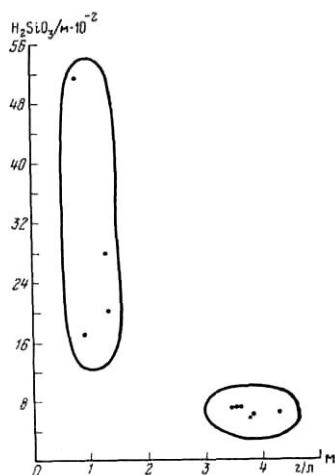


Рис. 93. Зависимость отношения H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> к минерализации от общей минерализации

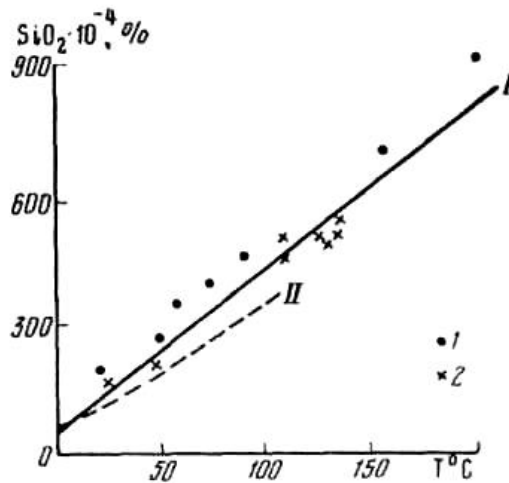


Рис. 94. Зависимость растворимости аморфного кремнезема от температуры  
 1 - Окамото; 2 - компиляция Александра; I - растворимость аморфного кремнезема; II - горячие источники, по Уайре

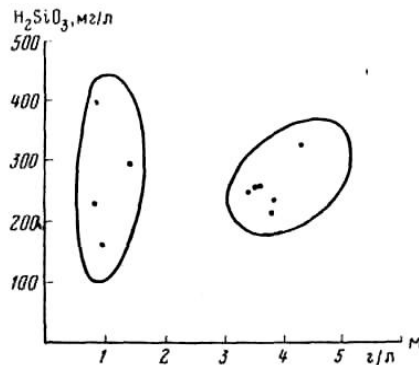


Рис. 95. Зависимость содержания кремнекислоты от минерализации термальной воды

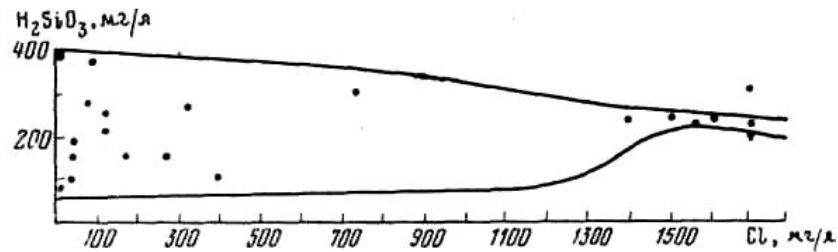


Рис. 96. Зависимость содержания в водах кремнезема от хлор-иона

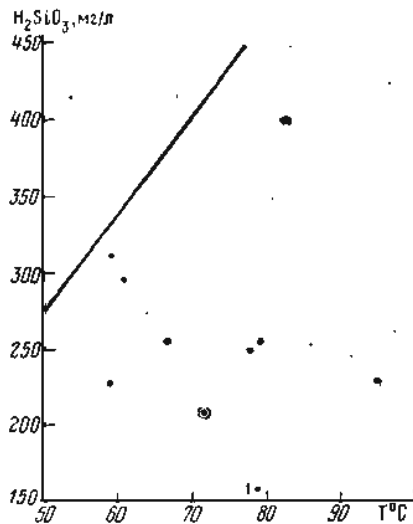


Рис. 97. Зависимость растворимости  $H_2SiO_3$  от температуры.

Вкрест осевой части в трех центральных грифонах вода имеет максимальную температуру ( $92^\circ$ ), среду, близкую к нейтральной (pH 6-7) и минерализацию 3,5 г/л. Хлоридно-натриевая компонента составляет в них 86-93 мг-экв-% сульфат-ион 6-14, гидрокарбонат-ион отсутствует. Для такой воды характерно постоянное отношение (в мг-экв-%): Na:Cl около 1, Ca:Cl 0,048-0,05, Na:K 19-26,  $SiO_2$ :M около 0,05 и невыдержанность отношения Ca:Mg. В спонтанных газах на фоне преобладания  $CO_2$  определяются относительно повышенные содержания  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$  (азот остается избыточным после вычета его и кислорода в воздушном отношении). Четко выступает повышенная металлонность, бороносность и нефтеносность вод. Содержание A-3 мг/л, Sb/s 0,4-0,7 мг/л, Pb около 1 мг/л, Zn 0,03-0,1 мг/л, Ag - 0,0006%. В осадках из вод преобладает кремнезем. Минеральный состав их: опал, каолинит с незначительной примесью алуниита, гипса и элементарной серы. Иловые растворы отлично от свободных хлоридно-натриевых вод имеют хлоридно-сульфатный состав пониженную кислотность и сложный катионный состав.

Воды в периферийных грифонах, отстоящих всего на 10 м от центральных, имеют резко отличный от хлоридно-натриевых вод состав (табл. 57). Они менее нагреты ( $40-60^\circ$ ), имеют пониженную минерализацию (0,9-1,4 г/л), иногда пониженную кислотность (pH 4-5), сложный сульфатно-хлоридный в северном фланге Осевой части Центрального термального поля и сульфатно-гидрокарбонатно-хлоридный состав в южной. Хлор-натриевая компонента в них по хлору составляет 46-60 мг-экв-%, сульфат-ион 25-40, гидрокарбонат-ион 0-29. Основные генетические коэффициенты в них не выдержаны: Na:Cl > 1, Ca:Cl выше, чем в хлоридно-натриевых водах (до 0,3 вместо 0,03). Na:K; Ca:Mg более резко варьируют, чем в хлоридно-натриевых водах. Содержание  $SiO_2$  в них уступает таковому в хлоридно-натриевых водах, однако в расчете на минерализацию значительно превышает ее ( $SiO_2 : M = 0,17-0,2$  против 0,05).

Таблица 57

**Состав термальных вод вдоль Центрального термального поля (в мг/л)**

Катионы	Точка I		Точка II		Точка III		Точка IV		Точка V	
	Вода	Иловый раствор	Вода	Иловый раствор	Вода	Иловый раствор	Вода	Иловый раствор	Вода	Иловый раствор
$H^+$	0,0	4,90	5,13	0,27	0,89	1,58	0,57	0,01	0,19	0,91
$NH_4^+$	13,5	23,0	27,9	5,0	15,8	3,0	15,9	4,5	10,8	1,0
$Na^+$	122,6	28,6	1054,3	132,9	1087,0	106,6	1161,5	41,3	90,0	30,8
$K^+$	20,0	4,3	107,2	15,4	95,7	6,6	91,4	4,3	8,2	4,6
$Ca^{2+}$	28,7	6,8	54,3	9,2	44,7	5,9	44,7	3,3	12,6	41,6
$Mg^{2+}$	7,2	3,0	4,6	2,3	0,7	0,9	1,6	0,5	5,4	6,8
$Al^{3+}$	0	—	3,5	—	0,0	—	2,8	—	0,0	—
$Fe^{2+}$	0	Следы	0	0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	3,0
$Fe^{3+}$	0	10,0	8,9	0	0,0	0	0,0	0,0	Следы	5,0
<b>С у м м а</b>	<b>192,0</b>	<b>80,6</b>	<b>1265,8</b>	<b>165,05</b>	<b>1244,8</b>	<b>134,6</b>	<b>1318,5</b>	<b>53,9</b>	<b>127,2</b>	<b>93,1</b>
$Cl^-$	120,0	35,4	1696,0	193,2	1746,0	143,4	1726,0	17,7	92,0	17,7
$SO_4^{2-}$	196,0	263,1	641,0	77,3	190,0	131,1	176,0	71,6	127,0	253,1
$HCO_3^-$	27,7	—	—	—	0,0	—	—	—	—	—
<b>С у м м а</b>	<b>343,7</b>	<b>398,5</b>	<b>2337,0</b>	<b>270,5</b>	<b>1936,0</b>	<b>274,5</b>	<b>1902,0</b>	<b>89,3</b>	<b>219,0</b>	<b>270,8</b>
$H_2SiO_3$	226,2	—	322	—	213	—	231	—	398	—
$H_3BO_3$	34,6	—	397,4	—	396,3	—	393,2	—	28,8	—
<b>Минерализация</b>	<b>796,3</b>	<b>479,1</b>	<b>4322,2</b>	<b>435,6</b>	<b>3790,4</b>	<b>409,1</b>	<b>3844,7</b>	<b>143,2</b>	<b>773,0</b>	<b>363,9</b>
pH	6,24	2,31	2,29	3,56	3,05	2,56	3,24	4,90	3,76	3,04
Na/Cl	1,58	1,24	0,96	1,06	0,96	1,15	1,04	3,6	1,51	2,68
K/Cl	0,15	0,11	0,057	0,0715	0,05	0,042	0,048	0,22	0,081	0,23
Ca/Cl	0,42	0,34	0,057	0,0845	0,045	0,072	0,046	0,32	0,24	4,15
Mg/Cl	0,175	0,25	0,079	0,035	0,0012	0,017	0,0027	0,08	0,17	1,12
Na/K	10,45	11,25	16,75	14,81	19,3	27,3	21,6	16,35	18,65	11,16
Ca/Mg	2,42	1,36	7,14	2,42	3,71	4,14	17,15	4	1,43	3,72
$H_2SiO_3/M$	0,284	—	0,076	—	0,056	—	0,06	—	0,515	—
NaCl, мг-экв-%	43	11	77	77	92	60	89	23	50	9

Слабо минерализованные воды периферийных грифонов имеют отличный от хлоридно-натриевых вод осевой части состав спонтанных газов. В них более существенную роль играют  $CO_2$  и  $H_2S$ ;  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$  присутствуют, но в меньших, чем в хлоридно-натриевых водах, количествах. Не менее резко выступает различие концентраций в водах металлов: As уменьшено в 3 раза, Sb, Ge нами не определялись, Pb, Zn несколько занижены. Осадки из вод периферийных грифонов имеют более сложный состав; в них значительную роль играет элементарная сера, а в осадках из вод с гидрокарбонатным ионом присутствует карбонат. Иловый раствор в осадках периферийных грифонов еще более сульфатный ( $SO_4^{2-}$  80-91 против 50 мг-экв-% иловых растворов хлоридно-натриевых вод).

Аналогичная горизонтальная зональность наблюдается в грифонах вдоль Осевой части Центрального термального поля. В трех внутренних грифонах на протяжении 600 м воды имеют хлоридно-натриевый состав, хлор-натриевая компонента по хлору достигает 78-93 мг-экв-%, воды имеют повышенную минерализацию - (3,8-4,3 г/л) реакцию, близкую к нейтральной и наиболее высокую температуру; отношение Na:Cl остается близким единице (0,96-1,03). Для них характерна повышенная рудная минерализация: As -2 мг/л, Sb - 0,45 мг/л, Pb - до 1 мг/л. Воды периферийных грифонов

характеризуются пониженной минерализацией (0,8г/л), хлоридно-сульфатным гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридным составом. Отношения основных компонентов резко варьирует: Na:Cl>1 (1,51-1,58), в них повышается роль кальция и магния и относительная роль кремнезема ( $SiO_2 : M = 0,3-0,5$  против 0,06-0,07).

В центральных грифонах иловые растворы хотя и более сульфатные, чем свободные воды, однако хлор-натриевая компонента в них составляет 50-80 мг-экв-% и Cl:Na близко 1. Иловые растворы в периферийных грифонах с водами сложного состава отличаются от иловых растворов центральных грифонов резко сульфатным составом:  $SO_4^{2-}$  80-90 мг-экв-%, Na:Cl>1, т. е. Na преобладает над Cl и поступает в воды из пород. В них резко увеличена роль щелочноземельных металлов (магния). В широкой промежуточной зоне по северному крылу Осевой части Центрального термального поля воды в озерах, грифонах, ручьях отличаются от хлоридных-натриевых вод глубинного разлома резко пониженной минерализацией; среда изменяется в сторону окисления, температура - понижения, солевой состав - усложнения, газовый - увеличения роли  $CO_2$  и  $H_2S$ , металлоносность - ослабления. Хлор-натриевая компонента в них присутствует, но подчинена другим компонентам; увеличена роль сульфат-иона, гидрокарбонат-иона и щелочно-земельных металлов. Генетические коэффициенты менее постоянны и отличаются от таковых в хлоридно-натриевых водах; типичное отношение Na:Cl колеблется от 1,2 до 4. По концентрациям в водах того или иного иона воды определяются, как сульфатно-хлоридные, хлоридно-сульфатные, гидрокарбонатно-сульфатные, гидрокарбонатно-хлоридно-сульфатные и др. При увеличении в водах сульфат-иона отношение Na:K часто уменьшается (за счет увеличения роли калия). Отношение Ca:Mg в водах такого типа по сравнению с хлоридными-натриевыми занижено за счет увеличения роли магния; кальций переходит в поглощенный комплекс. Абсолютные количества кремнезема в этом типе вод приближается к таковому в хлоридно-натриевых водах, однако при пересчете на общую минерализацию они оказываются значительно обогащенными кремнеземом ( $SiO_2 : M = 0,3$  против 0,05).

В водах сложного состава промежуточной зоны в спонтанных газах увеличена роль  $CO_2$ . Резко выступает ослабление рудной минерализации по сравнению с хлоридно-натриевыми водами Осевой части Центрального термального поля. Одновременно повышается концентрация Zn и других металлов. Осадки из вод такого состава с увеличением в них роли сульфат-ионов и гидрокарбонат-ионов имеют сложный состав. В них повышается роль гидратов железа, серы и карбоната (см. табл. 56). Иловые растворы из таких осадков существенно сульфатные и более кислые, чем в осадках водоемов с хлоридно-натриевой водой. Гидротермальное разложение пород в широкой промежуточной зоне на поверхности выражено в площадном развитии гидротермальных цветных глин опал-каолинитового, опал-лимонитового и опал-алунитового ряда.

Западное термальное поле локализовано на пересечении субширотного глубинного разлома с кольцевым и фиксирует интенсивное проявление паровой фазы, отделившейся, вероятно, от основной восходящей хлоридно-натриевой струи. Зеркало такой термальной воды здесь погружено. Термальная вода проявлена только в одном озере, расположенном между парящих бугров. Вода резко отличается от вод других термальных площадей своей повышенной минерализацией (до 4,5 г/л), кислотностью (pH<1), сульфатностью и сложным катионным составом. Несмотря на повышенную минерализацию такой воды, мышьяк и сурьма в ней и в донных кремнисто-серных илах находятся в пониженных концентрациях. Гидротермальное изменение пород на Западном термальном поле интенсивное и выражается вблизи поверхности в кислотном выщелачивании с образованием опалитов, каолинитов, опалово-алунитовых пород с серными бугорками и гипсовой шляпой.

Северное термальное поле расположено на буграх, у подножия северной стенки борта кальдеры, на пересечении оперяющего разлома с кольцевым; оно менее интенсивное. Среди гидротермально-измененных пород (опалитов, опалово-алунитовых и гидротермальных глин с серными буграми) в овраге сосредоточены выходы термальных вод в глубоких трубообразных грифонах, блюдцеобразных лужах и озере, из которого вытекает руч. Ягодный.

В трубообразном грифоне вода, поступающая из глубины, высоко нагрета (80°) имеет близкую к нейтральной реакцию (pH около 7) и сложный хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатный (Cl:HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> : S0<sub>4</sub><sup>-2</sup> = 23 : 30 : 47 мг-экв. %), калиево-аммонийно-кальциево-натриевый состав (Na:Ca:NH<sub>4</sub>:K = 41:32:13:11 мг-экв. %). Среди спонтанных газов на фоне  $CO_2$  определены  $N_2$ ,  $H_2$  и  $CH_4$ , а из металлов Pb, Ag и другие, свойственные хлоридно-натриевым водам.

В расположенных рядом мелких грифонах без стока вода кислая (pH-2,11), слабо нагретая (40°), сульфатная, аммонийная. Спонтанный газ на 92% состоит из  $CO_2$  и 1,47%  $H_2S$ . Вода содержит Zn в повышенных концентрациях (0,7 мг/л), Pb в пониженных. Это типичная конденсатная окисленная вода; температура ее благоприятствует развитию окисления серы под действием бактерий.

В основное озеро со дна поступает нагретая вода и обильные газы, которые вызывают на поверхности озера интенсивное бурление. Температура воды в участках выхода газа 80°, на периферии водоема 40°. Вода слабо минерализованная (0,3 г/л), кислая (pH - 2,7) имеет хлоридно-сульфатный состав. Хлор-натриевая компонента по хлору составляет 34 мг-экв. %, Na:K = 4. Среди металлов определены As и Pb.

Из кислой сульфатной воды в блюдцеобразных водоемчиках происходит садка кремнезема и серы. Осадки состоят на 30% из опала и 70% самородной серы. Поверхность высокотермальной хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатной воды в трубообразном грифоне покрыта пленкой сульфида железа.

На термоаномалии Узона существует реальная современная горизонтальная концентрическая зональность вокруг субширотной зоны разлома выраженная по выносу тепла, водам, газам, осадкам из вод, иловым растворам, гидротермально измененным породам, минералам металлогении.

**Горизонтальная зональность по водам.** От субширотной зоны разлома к периферии термоаномалии происходит смена перегретых хлоридно-натриевых вод через смешанные охлажденные менее минерализованные сложного состава на кислые сульфатные. Гидрохимическая зональность осложняется различным влиянием в промежуточной и краевой зонах глубинных хлоридно-натриевых вод и конденсатов гидротермального пара.

**Горизонтальная зональность по газам.** На фоне общего преобладания в гидротермальных газах термоаномалии углекислого газа намечается увеличенное содержание азота, водорода и метана в газе субширотной зоны разлома с восходящим потоком перегретых хлоридно-натриевых вод и увеличение роли углекислого газа и сероводорода к периферии термоаномалии (табл. 58). В силу высокой миграционной способности газа, особенно в условиях подземного вскипания и раздробленности пород термоаномалии, газовая зональность может не совпадать с гидрохимической и несколько затуманена.

Таблица 58

**Состав спонтанных газов термоаномалии кальдеры Узон (в объемн. %).**

Аналитик Т. Г. Алексеева

Место взятия пробы	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
Центральное термальное поле	95,29	0,17	0,14	0,0	0,78	0,30	3,32
Точка 1	67,66	3,90	0,28	0,0	1,16	27,00	0,0
» 2	85,45	0,12	0,23	0,0	2,88	11,33	Следы
» 3	78,35	3,77	1,08	0,0	5,60	11,2	0,06
» 4	92,11	0,0	0,73	0,0	0,32	1,83	5,01
» 5	74,26	2,58	0,0	0,0	1,03	22,13	0,06
» I	42,33	6,75	0,09	0,0	0,28	50,54	» »
» II	87,76	0,85	0,06	0,0	0,0	11,33	Следы
» III	89,15	0,09	0,0	0,0	0,0	8,61	2,15
Прокол	93,53	0,25	0,0	0,0	1,14	2,44	2,64
»	94,84	0,04	0,0	0,0	0,54	4,58	0,06
Фумарольное озеро. Четвертое озерко							
То же	32,41	12,91	1,08	0,0	0,0	53,60	» »
» »	25,79	13,38	1,87	0,0	0,0	58,96	0,59
Серные бугры Р-1	86,00	1,44	0,58	0,0	0,58	11,40	Следы
То же, Гейзер	86,79	1,56	0,59	0,0	1,61	9,45	0,06
Тростниковый участок	70,11	4,79	0,0	0,0	0,67	24,43	0,0
То же. Точка 2	99,38	0,0	0,0	0,0	0,0	0,62	0,06
» » Газирующий источник	87,02	2,56	0,0	0,0	0,49	9,93	» »
» » Скважина	70,11	4,79	0,0	0,0	0,67	24,43	» »
Северное термальное поле	91,84	0,09	0,0	0,0	3,08	4,49	1,47
То же	87,01	0,39	0,78	0,0	2,54	9,28	0,78
Западное термальное поле	56,26	7,44	1,66	0,0	0,0	34,64	0,06
То же	11,46	17,66	0,30	0,0	1,90	68,68	» »
» »	76,27	1,33	0,99	0,0	0,25	21,16	» »

**Горизонтальная зональность по осадкам из вод** проявляется в смене гейзеритов и кремнисто-ртутно-сурьяно-мышьяковых сульфидных осадков, характерных для осевой части термоаномалии с максимальным выносом тепла и проявлением металлоносных, богатых кремнеземом хлоридно-натриевых вод на осадки сложного состава (кремнисто-каолинитовые, кремнисто-лимонитовые, кремнисто-пиритные, кремнисто-серные) в промежуточной и краевой зонах. К периферии месторождения и в грифонах с максимальным влиянием компоненты конденсата гидротермального пара в осадках увеличивается роль элементарной серы. На осложнение горизонтальной зональности по осадкам влияет ряд факторов. Несмотря на сходство составов вод в проколах и котлах осевой части термоаномалии на дне и стенках котлов осадки резко отличаются по составу от гейзеритов проколов максимально прогретой части термоаномалии. Кремнезем остается ведущим компонентом (53%), но осадки существенно обогащены окислами алюминия (до 17%), железа (до 6%), кальция, магния и щелочных металлов. Содержание окислов титана в них повышено по сравнению с гейзеритами, соответственно понижено отношение SiO<sub>2</sub>:TiO<sub>2</sub>. Содержание окислов кальция, магния и щелочных металлов в илах по сравнению с таковыми в породах занижено,

наоборот содержание марганца и фосфора завышено. В илах в различных соотношениях присутствует сульфатная, сульфидная и элементарная сера. Минеральный состав сложный: каолинит, опал, алунит, гипс, барит, сера, пирит, марказит и др. Водные вытяжки из таких илов весьма существенно отличаются от свободных хлоридно-натриевых вод, они имеют значительно повышенную сульфатность.

Сульфатность иловых растворов определяется влиянием биогенного окисления серосодержащих компонентов илов. Указания на интенсивность процессов биогенного окисления серосодержащих компонентов в породах термальных полей Камчатки имеются в работах М. В. Иванова и др. (1969). Микробиологические анализы показывают, что в образцах с температурой 45° и менее обнаруживаются значительные количества тионовых бактерий. *Thioxidane* энергично окисляют элементарную серу в серную кислоту, а *Thefeuroxidane* окисляют сульфиды, серу и закисное железо. Соответственно илы и гидротермальные глины стенок грифонов с хлоридно-натриевой водой, имеющей реакцию, близкую к нейтральной, - кислые и ультракислые (табл. 59).

Основная хлоридно-натриевая вода коренной струи на выходе имеет реакцию, близкую к нейтральной. В такой воде алюминий не может быть в растворе, что подтверждается химическим анализом воды. В составе илов водоемов с восходящей хлоридно-натриевой водой определяется до 20%  $Al_2O_3$ . Кремнисто-глинистые илы в грифонах с хлоридно-натриевой водой образовались не столько в результате хемогенной садки, сколько за счет разложения пород стенок грифонов. Нейтральная хлоридно-натриевая вода (потерявшая уголекислоту и сероводород) на поверхности слабо активна, непосредственно на ее выходах в участках максимального прогресса породы не претерпевают существенных химических изменений. Интенсивное разложение пород стенок грифонов происходит на некотором расстоянии от восходящей высоко нагретой струи, где температура снижена. Иловые растворы в этих условиях становятся существенно сульфатными, кислыми и интенсивно разлагают породы. В грифонах с нейтральной хлоридно-натриевой водой в результате реакций окисленный иловый раствор - порода происходит загрязнение глубинных хлоридно-натриевых вод сульфат-ионом, породообразующими и микрокомпонентами, а хемогенных осадков - твердыми продуктами разложения пород.

Таблица 59

Состав смешанных вод и иловых растворов (в мг/л)

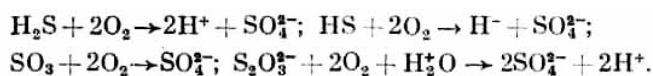
Катионы	Точка 1		Точка 5		Озеро Серное			Озеро Банное	Озеро Оранжевое	Грифон Цепочка	Ручей Миши	
	Вода	Иловый раствор	Вода	Иловый раствор	Вода	Конденсат	Иловый раствор, $\lambda=0$	Иловый раствор, $\lambda=1,5$ ж	Вода	Вода	Вода	Вода
$H^+$	0,0	—	0,87	1,15	3,16	—	0,89	0,04	—	—	1,2	0,03
$NH_4^+$	12,2	32,9	14,4	3,0	65,6	104,0	10,5	7,5	20,0	1,0	10,0	0,2
$Na^+$	178,8	29,5	260,9	17,4	333,3	—	45,7	35,6	—	25,0	100,0	18,9
$K^+$	22,3	3,3	17,4	2,0	36,3	—	5,5	4,2	103,2	7,8	14,6	5,4
$Ca^{2+}$	31,3	5,9	27,5	4,8	72,8	—	7,2	2,0	32,0	20,0	25,1	28,0
$Mg^{2+}$	4,75	2,2	9,6	1,8	5,8	—	6,9	—	4,8	6,9	8,6	—
$Fe^{2+}$	—	Следы	Следы	—	—	—	Следы	—	—	—	—	—
$Fe^{3+}$	—	—	0,4	0,5	2,8	—	Следы	—	—	—	—	—
$Al^{3+}$	—	—	4,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
С у м м а	249,4	73,8	335,1	30,7	519,8	104	70,69	49,44	160,0	69,7	162,2	52,5
$Cl^-$	177,5	24,8	339,4	14,2	404,0	—	30,1	30,14	—	9,6	126,6	19,2
$SO_4^{2-}$	129,0	88,4	292,0	86,5	766,0	170,0	153,2	58,2	336,0	146,5	312,0	82,3
$HCO_3$	195,2	24,4	—	—	—	141,5	—	—	36,6	18,3	—	—
С у м м а	501,7	137,6	621,4	100,7	1170	311,5	183,3	88,3	372,0	174	438,6	101,5
$H_2SiO_3$	163,8	—	289,9	—	108,4	—	—	—	—	—	261,0	84,5
$H_3BO_3$	40,0	—	111,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Минерализация	954,9	211,4	1358,3	131,4	1798,2	415,5	254,0	137,8	532,6	246,1	861,8	238,0
pH лабор	7,08	6,54	3,06	2,94	2,51	7,57	3,05	4,38	5,4	6,5	2,91	4,55
pH полевог	6,8	5,6	6,3	5,4	5,6	6,5	6,3	6,6	—	—	6,6	—
Na/Cl, мг · экв · %	1,5	1,8	1,4	1,9	1,3	8	2,3	1,8	—	4,0	1,2	1,5
K/Cl	0,11	0,11	0,05	0,12	0,08	—	0,16	0,13	—	0,74	0,1	0,26
Ca/Cl	0,31	0,41	0,14	0,60	0,31	—	0,42	0,11	—	3,7	0,35	2,59
Mg/Cl	0,078	0,25	0,08	0,37	0,04	—	0,08	0,01	—	2,1	0,2	—
Na/K	13,6	16,0	26	15,2	15,6	—	14,2	14,1	—	5,4	11,8	5,8
Ca/Mg	4,0	1,8	1,7	1,6	7,6	—	5,1	10	—	1,7	1,7	—
$H_2SiO_3/M$	0,17	—	0,14	—	0,06	—	—	—	—	—	0,3	0,3
NaCl, мг · экв · %	46	24	60	18	42	—	—	—	—	7	36	24

Окисление первичных, близких к нейтральным, хлоридно-натриевых вод и соответственно повышение их агрессивных свойств могло происходить в благоприятных условиях за счет самоокисления



воды. В хлоридно-натриевых водах присутствуют соединения серы, в основном сульфат-ион. В единичных пробах наравне с сульфатом были определены сульфит, гидросульфат и тиосульфат.

Неустойчивые компоненты (и pH) определялись в поле. При последующих лабораторных определениях было отмечено понижение pH большинства проб с 6 до 3. Изменение во всех пробах сопровождалось исчезновением сернистых соединений ( $H_2S, HS^-, S_2O_3^{2-}, S_2^{2-}$ ). Очевидно, произошло окисление сернистых соединений:



Образующаяся в процессе окисления серная кислота диссоциирует, понижая pH. Сернистые соединения определялись в виде  $H_2S$ . Можно по этим данным высчитать pH, которое получается при полном его окислении по формуле:

$$pH = \log \left[ \frac{H_2S}{2} \right].$$

Результаты расчета прямых определений pH приведены в табл. 60.

Таблица 60

Расчет прямых определений pH (Центральное поле)

Проба	Точка 3	Точка 4	Точка III	Точка IV	Точка V
pH лабораторный	3,58	4,29	3,05	3,24	3,71
pH рассчитанный	4,63	3,92	3,75	3,42	3,66
pH полевой	6,3	6,3	5,9	6,6	6,6
$H_2S$ , мг · экв/л	0,02	0,12	0,18	0,38	0,22

Воды с pH - 3 активно разлагают породы стенок и дна грифонов, котлов и определяют загрязнение кремнистых осадков окислами других металлов. Илы котлов промежуточной и внешней зон со смешанной водой по химическому и минеральному составу не резко отличаются от илов в котлах с типичной хлоридно-натриевой водой. Это определяется сходством условий их формирования в окислительной среде менее прогретых участков. Илы в промежуточной и внешней зонах в силу увеличения в формировании вод роли конденсата гидротермального пара обогащены самородной серой.

В случае присутствия в воде и иловом растворе гидрокарбонат-иона отношение Ca:Mg сдвигается в сторону увеличения роли кальция в осадках (Ca:Mg в воде - 4, в иловом растворе - 2,7, в осадке - 15) и появления в них кальцита.

Для определения возможностей осаждения кальцита были проведены пересчеты анализов вод. Такие же расчеты по равновесию карбонатов проведены Г. Гаррисом («Минеральные равновесия», 1962 г.).

Использовались следующие два уравнения:

$$\frac{[H^+][CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} = K_{HCO_3^-} = \frac{10^{-10,22}[Ca^{+2}][CO_3^{2-}]}{40^\circ C, 1 \text{ атм}} = K_{CaCO_3} = \frac{10^{-8,51}}{40^\circ C, 1 \text{ атм}}$$

Уравнения в выражениях молярности и коэффициентов активности:

$$\frac{a_{H^+} m_{CO_3^{2-}}}{m_{HCO_3^-}} = \frac{10^{-10,22} \gamma_{HCO_3^-}}{\gamma_{CO_3^{2-}}} m_{Ca^{2+}} m_{CO_3^{2-}} = \frac{10^{-8,51}}{\gamma_{Ca^{2+}} \gamma_{CO_3^{2-}}}$$

Для расчёта составлена табл. 61. Было высчитано необходимое содержание кальция для выпадения кальцита из этих вод ( $m'Ca$ ). Содержание  $Ca^{2+}$  должно быть выше, чем в анализируемых пробах.

Таблица 61

Расчет содержания в водах Ca, необходимого для осаждения кальцита

$a_{H^+}$	$m_{Ca^{2+}}$	$m_{HCO_3^-}$	$\gamma_{Ca^{2+}}$	$\gamma_{HCO_3^-}$	$\gamma_{CO_3^{2-}}$	$m'Ca$	$M$
$10^{-5,4}$	$10^{-3,1}$	$10^{-3,22}$	$10^{-0,17}$	$10^{-0,045}$	$10^{-0,18}$	0,56	0,0115
$10^{-6,5}$	$10^{-3,30}$	$10^{-3,85}$	$10^{-3,13}$	$10^{-0,033}$	$10^{-0,13}$	0,12	0,0056

Выпадение кальцита происходит из вод другого состава. Состав иловых растворов в донных осадках имеет отличный от свободных вод состав; образование кальцита происходило в их среде.

**Горизонтальная зональность по иловым растворам** подчиняется горизонтальной зональности по осадкам из вод. На их состав оказывает влияние температурный фактор, поскольку прогретость определяет степень биогенного окисления. Иловые растворы изучались по водным вытяжкам.

В гейзеритах осевой части Центрального термального поля иловые растворы по составу приближаются к свободно изливающейся хлоридно-натриевой воде. Прогретость до  $100^\circ$  площадки отрицает возможность биогенного окисления серы и сульфидов в гейзеритах и соответственно резкого повышения кислотности и сульфатности иловых растворов. К периферии термоаномалии состав иловых растворов становится существенно сульфатным и более сульфатным, чем свободная вода в точке его отбора.

**Горизонтальная зональность по гидротермально-измененным породам** выступает отчетливо. В осевой части термоаномалии с выходами перегретой хлоридно-натриевой воды вблизи поверхности проявляется аргиллизация и цеолитизация. Промежуточная зона развития вод смешанного состава характеризуется гидротермальными глинами опал-каолинитового и опал-лимонитового состава. Периферия термоаномалии (особенно Северное и Западное термальные поля) характеризуется развитием преимущественно опаловых, опал-алунитовых и опал-каолинитовых фаций. Метасоматическая зональность подчиняется тепловой и гидрохимической. Там, где зеркало термальных вод приближено к поверхности, приближены и фации аргиллизации и цеолитизации. Там, где зеркало термальных вод погружено, развиваются фации сернокислотного выщелачивания: опаловые, опал-алунитовые и опал-каолинитовые. Промежуточная зона термоаномалии как менее прогретая отличается площадным развитием гидротермальных глин.

Металлогеническая горизонтальная зональность проявляется отчетливо и контролируется выходами глубинных хлоридно-натриевых металлоносных гидротерм и глубинной хлор-натриевой компонентой в других химических типах термальных вод. В Осевой части Центрального термального поля в области зоны разлома воды осадки из вод и гидротермально-измененные породы максимально обогащены As, Sb, Hg, Pb, Ag, Au, Cs, Rb, Li, Be, Ge, В. К периферии термоаномалии металлоносность всех фрагментов современного гидротермального процесса претерпевает постепенное и существенное ослабление (табл. 62). В кислых сульфатных термах появляются компоненты, выщелоченные из пород.

Таблица 62

**Распределение металлов по зонам термоаномалии (средние величины, в вес. %)**

Место взятия пробы	Количество определений	Элементы																						
		Ni, н·10 <sup>-4</sup>	Co, н·10 <sup>-4</sup>	Cr, н·10 <sup>-4</sup>	V, н·10 <sup>-4</sup>	Pb, н·10 <sup>-4</sup>	Mo, н·10 <sup>-4</sup>	Cu, н·10 <sup>-4</sup>	Zn, н·10 <sup>-4</sup>	As, н	Sb, н·10 <sup>-4</sup>	Li, н·10 <sup>-4</sup>	Ti, н	Ba, н·10 <sup>-4</sup>	Zr, н·10 <sup>-4</sup>	Ce, н·10 <sup>-4</sup>	Ga, н·10 <sup>-4</sup>	Sr, н·10 <sup>-4</sup>	Be, н·10 <sup>-4</sup>	W, н·10 <sup>-4</sup>	Bi, н·10 <sup>-4</sup>	Ag, н·10 <sup>-4</sup>		
<b>Осевая часть Центрального термального поля</b>																								
Вода	13	—	—	—	11*	417*	0,014*	0,0012**	63*	2000*	300*	—	—	0,6*	—	0,001*	0,0001**	—	—	—	300*	—	0,0015*	
Гидротермальная глина	19	0,8	1,6	0,5	13	0,2	0,15	2,5	2	0,126	—	—	0,02	1	11	0,06	1	—	—	15	18	2,3	3	0,48
Осадок из воды	10	1	1,45	0,3	5,5	0,14	0,35	3	0,7	0,285	—	—	0,18	—	4,1	0,6	2,4	0,2	65	20	8	0,2	—	
Рудный горизонт	27	1	2	0,4	100	0,3	—	3,5	450	3,0	13	1,4	0,38	0,04	150	—	4,8	0,6	18	30	0,8	—	—	
<b>Серые бугры</b>																								
Вода	9	—	—	—	4*	2*	—	0,0006**	4,0*	500*	20*	—	—	0,12*	—	—	0,0001	—	—	—	—	150*	—	—
Гидротермальная глина	3	—	0,33	—	2	—	—	5,7	67	0,005	—	—	0,30	—	6	—	0,33	0,33	26	26	—	—	—	
Осадок из воды	8	0,5	1	120	7	—	—	0,075	6,2	6,2	0,027	—	—	0,35	27	11,1	7,2	2	10,2	3,7	—	—	—	
Рудные отложения	11	1,3	1,8	0,45	4,2	0,1	0,81	10,8	10,1	0,35	1	0,27	0,43	—	95	—	1,5	0,45	1,8	187	0,83	—	—	
<b>Северный бор Центрального термального поля</b>																								
Вода	6	—	—	—	6*	2*	—	0,0030**	150*	15*	40*	—	—	—	—	0,0002**	—	—	—	—	—	120*	—	—
Гидротермальная глина	15	0,61	0,35	0,03	8,3	0,6	0,42	1,7	3,4	0,0052	—	—	1,9	0,90	—	—	—	—	—	—	—	0,7	1,6	2,8
Осадок из воды	8	0,61	0,8	1	9,1	0,13	0,09	2,9	3	0,007	—	—	0,6	0,38	—	90	—	5	2,5	3,5	4	1,1	0,9	0,8
<b>Промежуточная зона термоаномалии</b>																								
Вода	16	—	—	—	0,5*	6*	—	0,0015**	18*	80*	20*	—	—	—	—	0,0005**	0,0003	—	—	—	—	80*	—	—
Гидротермальная глина	4	0,75	0,5	0,75	8	0,15	0,18	1,6	25	—	—	—	0,57	18	3	—	0,25	—	0	—	—	0,15	0,8	0,8
Осадок из воды	13	2,7	1	1	5,8	0,07	0,03	6	10	0,012	—	—	0,2	0,48	6	20	8	1	13	—	—	0,2	0,4	0,7
<b>Краевая зона (Северное термальное поле)</b>																								
Вода	11	—	—	—	25*	17*	—	0,0007**	88*	—	—	—	—	—	—	—	0,0001	—	—	—	—	60	—	—
Гидротермальная глина	3	—	0,33	—	2	—	—	4,1	6,6	0,005	—	—	0,5	—	6	—	0,33	0,33	—	26	—	—	—	
Осадок из воды	9	0,53	0,75	110	8,3	0,33	0,078	5,3	50	0,024	—	—	0,62	24	9	—	6,4	1,5	9	3,3	—	—	—	

\* Содержания в мг/л. \*\* вес. %.