

Наши измерения показали, что именно трековые методы обладают достаточно высокой чувствительностью.

Расчеты радиогенного тепла, сделанные на основе полученных трековым методом результатов, показывают, что генерация радиогенного тепла в осадочной толще исследуемого района весьма существенна, например, в толще мощностью только 1 км дает для платформенного района примерно 5% общего потока тепла, а в километровой толще глинистых пород предгорного прогиба — даже 10% общего теплотока. Для палеозойского фундамента на участке эпигерцинской плиты рассчитаны тепловые потоки, средний из них составляет  $1,224 \text{ мккал/см}^2 \cdot \text{с}$ .

#### Л и т е р а т у р а

- Берзина И.Г., Воробьева И.В., Гезузин Я.Е. Об особенностях кинетики залечивания следов от осколков деления урана в тонких пластинках слюды. — Докл. АН СССР, 1967, т. 175, № 4, с. 807—810.
- Берзина И.Г., Берман И.Б., Гураич М.Ю., Флеров Г.Н., Шмилевич Ю.С. Определение урана и его пространственного распределения в минералах и горных породах. — Атомная энергия, 1967, № 6, с. 520—527.
- Джамалова А.С. Тепловой поток и генерация радиогенного тепла в эпигерцинских структурах Дагестана. — Докл. АН СССР, 1967, т. 176, № 1, с. 76—79.
- Джамалова А.С. Глубинный тепловой поток на территории Дагестана. М.: Наука, 1968.
- Price B., Walker R.H. — Phys. Letters, 1962, vol. 3, N 3, p. 113.

Л. Н. Барабанов, Т. П. Кирсанова, Г. Ф. Пилипенко,  
В. М. Сугробов, Н. Г. Сугробова

*Институт вулканологии ДВНЦ АН СССР*

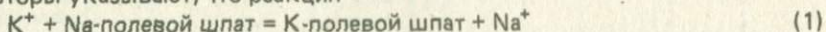
## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ

В данной статье анализируются гидрохимические данные, полученные в период полевых исследований современных гидротерм Камчатки и Курильских островов, с целью индикации глубинных температур, методика которой изложена в работах Р.О. Фурнье, И.И. Роу, А.Х. Трюсделла, Д.Е. Уайта и др. (Fournier, Rowe, 1966; Fournier, Truesdell, 1973, 1974, 1975; Fournier, White, Truesdell, 1974). Кроме того, придерживаясь мнения, что состав природных высокотемпературных вод и паров гидротермальных систем вулканических областей формируется под воздействием вулканических горных пород и внедрения глубинного флюида, авторы делают попытку использовать гидрохимические данные для оценки доли глубинного флюида в термальных водах.

Нами привлечен для обработки пока что неполный и еще не достаточно, быть может, представительный материал о парогидротермах Курило-Камчатской области. Однако он позволяет представить в целом возможности применения гидрохимической геотермометрии и в качестве примеров остановиться более подробно лишь на материалах Лаужетского и Горячеплажного геотермальных месторождений.

## Гидрохимический калий-натрий-кальциевый геотермометр

Возможность определения температуры среды с помощью данных о растворенных в воде ионах  $K^+$ ,  $Na^+$  и  $Ca^{2+}$  основана на плагиоклазовом геотермометре, т.е. на явлении последовательного отложения плагиоклазов при снижении температуры (от альбита до анортита). Теоретические предпосылки и эмпирические возможности использования гидрохимических данных изучили Р.О. Фурнье и А.Х. Трюсделл (Fournier, Truesdell, 1973, p. 1255) путем анализа реакций преобразования полевых шпатов. Авторы указывают, что реакция

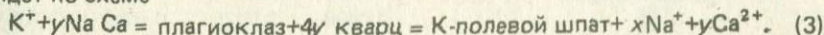


была исследована П.М. Орвиллем (Orville, 1963), константа равновесия ее  $K$  изменяется от температуры по уравнению Вант-Гоффа:

$$d \lg K/d(1/T^\circ K) = - (\Delta H^\circ T/4,5758). \quad (2)$$

Поскольку  $\Delta H$  очень мало зависит от температуры и вычислить активности калия и натрия очень трудно, для практических целей берутся молярные концентрации  $Na$  и  $K$  (при  $\gamma = 1$ ). Тогда график зависимости  $\lg Na/K$  (от  $1/T^\circ K$ ) представляет собой почти прямую линию. Нами этот график построен по данным табл. 1 (106 точек наблюдений). Отношение  $Na/K$  в целом для всех 106 точек Курило-Камчатской области не достаточно показательно, чтобы судить о температуре формирования вод в силу большого разнообразия гидротермальных проявлений. Подобным же путем Р.О. Фурнье и А.Х. Трюсделл исследуют поведение отношений  $Ca/K$  и  $Ca/Na$  с изменением температуры. Эти отношения закономерно, но не достаточно четко и показательно растут с понижением температуры.

Наибольший интерес имеет анализ процесса гидротермального изменения плагиоклаза в калиевый полевой шпат с высвобождением ионов  $Na^+$  и  $Ca^{2+}$ . Реакция эта весьма характерна для андезитобазальтовых пород и идет по схеме



При коэффициенте активности  $\gamma = 1$  приближенная константа этой реакции  $N$  равна

$$N = \frac{Na^{(x-2\gamma)} \cdot Ca^\gamma}{K} \quad (4)$$

или

$$\lg N = \lg (Na/K) + \beta \lg (\sqrt{Ca}/Na). \quad (5)$$

Коэффициент  $\beta$  зависит от стехиометрии реакции и колеблется в пределах от  $4/3$  при  $T < 100^\circ C$  до  $1/3$  при  $T > 100^\circ C$ .

Результирующая линия графика зависимости  $\lg N$  от  $10^3/T^\circ K$ : (или линия равновесия) изображена на рис. 1 и идет по координатам: от  $y = 0,56$  и  $x = 1,70$  до точки  $y = 3,03$  и  $x = 3,20$ . В выбранных нами масштабах шкал  $x$  и  $y$  линия равновесия отвечает уравнению

$$y = 3,85x - 5,15 \quad (6)$$

или

$$\lg N = -5,15 + 3,85 (10^3/T^\circ K). \quad (7)$$

Таблица 1

Характеристика термальных вод Курило-Камчатской области для определения

№ п/п	Местоположение и название источника	Тип воды	Содержание компонентов			
			Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	SiO <sub>2</sub> -1 млн
			млн <sup>-1</sup> г-и/л	млн <sup>-1</sup> г-и/л	млн <sup>-1</sup> г-и/л	суммарная/не- коллоидная
1	2	3	4	5	6	7
<b>Камчатка</b>						
<i>Срединный хребет</i>						
1	Апальский	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Cl <sup>-</sup>	372 0,0161	22 0,0006	16 0,0004	287 181
2	Эссовский	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	104 0,0045	3 0,0001	85 0,0021	87 82
<i>Долина р. Киревны</i>						
3	Нижняя и Верхняя группы источников	Cl <sup>-</sup>	507 0,0221	34 0,0009	40 0,001	196 145
4	Средняя группа	То же	489 0,0212	18 0,0005	24 0,0006	203 136
5	Малый Ключ, Нижняя группа	"	467 0,0203	16 0,0004	192 0,0048	175 130
<i>Кальдера Узон</i>						
6	Центральный	"	1137 0,0494	93 0,0024	44 0,0011	268 169
7	№ 2, Центральный	"	1144 0,0498	98 0,0025	48 0,0012	214 108
8	№ 32, Главный грифон	"	778 0,0338	130 0,0033	27 0,0007	221 155
9	№ 32, Грязевой	"	622 0,027	96 0,00025	26 0,000065	182 163
10	Гейзеритовый	"	511 0,0223	45 0,0012	17 0,0004	353 190
<i>Долина Гейзеров</i>						
11	№ 93, Верхнегейзерный	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	39 0,0017	— —	10 0,00025	200 134
12	Гейзер Большая Печка	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Cl <sup>-</sup>	672 0,0292	— —	16 0,0004	320 185
13	То же, Фонтан	То же	565 0,0246	54 0,0014	32 0,0008	308 179
14	" Великан	Cl <sup>-</sup>	597 0,0259	60 0,0015	26 0,00065	332 201
15	" Большой	То же	690 0,03	— —	28 0,0007	360 201

геотемпературных условий

Т, °С воды источника или ПВС скважины	Исследователь	lg N	Температура, °С		
		при $\beta = 1/3$	по К—Na—Ca-геотермометру	по SiO <sub>2</sub> -геотермометру	по SiO <sub>2</sub> —K—Na—Ca-геотермометру
8	9	10	11	12	13
96	В.В. Иванов	1,48 1,58	103	171	169
52	То же	2,05 3,05	48	119	104
98	Т.П. Кирсанова	1,45 1,61	105	152	154
77	То же	1,68 1,75	84	148	148
68	"	1,88 2,41	69	145	140
94	Г.Ф. Пилипенко	1,25 1,08	108	165	169
94	То же	1,25 1,09	108	134	141
64	"	1,07 0,96	81	157	164
54	"	1,12 1,10	71	161	168
84	"	1,26 1,22	96	175	177
74	В.И. Кононов	0,32 1,29	86	148	170
96	То же	1,28 1,22	107	173	175
99	В.В. Иванов	1,28 1,34	109	170	172
96	То же	1,23 1,23	107	176	177
96	В.И. Кононов	1,29 1,27	107	178	168

1961

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7
	Карымско-Семячинский район					
16	Нижнесемячинский	$\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$	117 0,0051	39 0,001	200 0,005	159 117
17	Источник на оз. Теплом	То же	284 0,0124	40 0,001	75 0,0019	104 84
18	Центральный	"	238 0,0104	40 0,001	167 0,0042	117 95
	Петропавловский район					
19	Источник в долине р. Налачевой	$\text{Cl}^-$	982 0,0426	167 0,0043	256 0,0064	191 141
20	Грифон Новый, там же	То же	1139 0,0495	131 0,0034	170 0,0042	151 111
21	№ 15, Аагский	$\text{HCO}_3$	69 0,003	13 0,00033	44 0,0011	185 157
22	№ 18, Аагский	То же	77 0,0034	8 0,0002	86 0,0021	162 120
23	Скв. 14, у санатория Начики	$\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$	334 0,0145	11 0,0003	24 0,0006	81 86
24	№ 1, Малкинский	То же	163 0,0071	7 0,0002	4 0,0001	117 95
25	Голубой грифон, Больше-Баннный	$\text{SO}_4^{2-}$	357	77	12	313
26	Новый, Больше-Баннный	$\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$	348 0,0151	13 0,00033	14 0,00035	110 89
27	Великан, Больше-Баннный	То же	334 0,0145	6 0,00016	12 0,0003	303 175
28	Скв. 6, Средняя Паратунка	$\text{SO}_4^{2-}$	241 0,0105	6 0,00016	84 0,0021	79 75
29	Скв. 45, Нижняя Паратунка	$\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$	405 0,0176	10 0,00026	190 0,0047	92 87
30	Верхнепаратунский	То же	235 0,0102	1,7 0,00004	68 0,0017	62 59
	Вулкан Мутновский					
31	Воронка у фумаролы № 7	$\text{SO}_4^{2-}$	49 0,0021	10 0,00025	403 0,01005	271 171
32	Большой серный котел	То же	322 0,0139	82 0,0021	1635 0,0408	132 107
33	Комплексный Нижнежировской	"	213 0,0094	6 0,00016	1,1 0,00003	121 98
34	№ 1, Нижнежировской	$\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$	172 0,0075	10 0,00024	10 0,00026	166 123
35	Толкач, Нижнежировской	То же	194 0,0084	6 0,00016	1,1 0,00003	117 95
	Вулкан Ксудач					
36	Источник на Горячем Пляже	"	165 0,0072	11 0,00028	85 0,0021	(80) (76)

8	9	10	11	12	13
50	В.В. Аверьев,	1,09	55	138	130
	Е.А. Вакин	2,23			
41	Б.В. Иванов,	1,27	52	121	122
	Р.А. Шувалов	1,81			
38	То же	1,27	48	128	125
		2,07			
75	В.В. Иванов	1,09	79	151	143
		2,07			
75	Б.Г. Поляк и др.	1,21	87	136	143
		1,32			
38	Е.А. Вакин	1,30	47	158	145
		2,34			
29	То же	1,40	32	139	124
		2,81			
81	Л.Н. Барабанов,	1,92	73	123	106
	В.Н. Дислер	3,15			
83	То же	1,65	89	128	128
		1,81			
53	В.И. Кононов,	0,82	71	171	144
	Б.Г. Поляк	0,87			
98	То же	1,69	104	124	127
		1,78			
98	"	1,98	100	168	158
		2,07			
83	Л.И. Барабанов,	1,84	83	116	107
	В.Н. Дислер	2,48			
78	Ю.Ф. Манухин и	2,04	76	123	110
	др.	2,63			
70	Б.Г. Поляк и др.	2,59	64	107	92
		3,20			
50	И.Т. Кирсанов	1,50	47	166	166
		3,17			
80	То же	1,11	81	134	143
		2,27			
100	Е.А. Вакин,	1,68	106	130	130
	Б.Г. Поляк	1,43			
99	Г.А. Гонсовская	1,60	102	141	142
		1,93			
100	Т.П. Кирсанова,	1,66	108	128	129
	Ю.Ф. Манухин	1,45			
58	Ю.М. Дубик,	1,68	61	116	121
	И.А. Меняйлов	2,49			

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7
	Паужетский район					
37	Курильский, Теплая бухта	$\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$	112 0,0049	10 0,00026	19 0,00047	(50) (48)
38	Озерновский	То же	179 0,0078	3 0,0001	176 0,044	117 95
38а	Гейзер I, Паужетка	$\text{Cl}^-$	984 0,0429	75 0,002	56 0,0014	216 145
39	Парящий I, там же	То же	970 0,0421	74 0,0019	56 0,0014	228 153
39а	Камбальный (правый склон долины р. Правой Паужетки)	"	-	-	-	-
40	Скв. Р-1, Паужетка	"	668 0,0299	31 0,0008	143 0,0357	179 132
41	Скв. 1, там же	"	899 0,0391	37 0,00095	52 0,0013	231 135
42	Скв. 4 "	"	808 0,0351	46 0,00012	42 0,00105	231 135
43	Скв. 5 "	"	793 0,0345	49 0,00125	63 0,00157	217 145
44	Скв. 6 "	"	832 0,0362	42 0,0011	77 0,0019	211 141
45	Скв. 7 "	"	1016 0,0442	81 0,0021	42 0,00105	330 191
46	Скв. 8 "	"	932 0,0405	51 0,0013	52 0,0013	280 176
47	Скв. 9 "	"	1003 0,0448	88 0,0023	56 0,0014	273 172
48	Скв. 10 "	"	932 0,0405	64 0,0022	52 0,0013	305 176
49	Скв. 11 "	"	972 0,0423	43 0,0011	44 0,0011	236 158
50	Скв. 12 "	"	1001 0,044	96 0,0025	65 0,0016	356 199
51	Скв. 13 "	"	951 0,0414	83 0,0023	50 0,00125	288 181
52	Скв. 14 "	"	986 0,043	105 0,0027	52 0,0013	394 220
53	Скв. 15 "	"	945 0,041	51 0,0022	44 0,0011	290 182
54	Скв. 16 "	"	1007 0,0466	101 0,0026	54 0,00135	344 199
55	Скв. 17 "	"	9991 0,043	92 0,0029	55 0,0014	325 188
56	Скв. 18 "	"	1005 0,0456	80 0,00225	54 0,00135	330 192
57	Скв. 20 "	"	968 0,042	89 0,0023	54 0,00135	322 186

8	9	10	11	12	13
35	Л.Н. Барабанов	1,50 2,15	43	98	98
86	В.В. Иванов	2,33 3,76	—	128	123
100	В.М. Сугробов	1,30 1,22	111	152	156
100	То же	1,32	110	155	158
75	"	—	—	—	—
122	"	1,85 2,65	123	146	143
139	"	1,60 1,57	142	148	148
160	"	1,46 1,42	158	148	150
123	"	1,46 1,52	129	152	154
141	"	1,56 1,64	143	150	152
180	"	1,38 1,26	180	175	175
159	"	1,47 1,42	158	169	169
—	"	1,27 1,20	—	165	168
164	"	1,24 1,19	167	168	170
157	"	1,57 1,46	156	159	159
175	"	1,25 1,21	176	178	178
177	"	1,24 1,17	178	171	172
190	"	1,07 1,00	193	184	189
166	"	1,26 1,20	169	171	172
182	"	1,22 1,12	184	178	179
181	"	1,26 1,19	174	174	175
166	"	1,29 1,22	167	175	174
194	"	1,25 1,19	195	173	175



Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	
58	Скв. 21, Паужетка	Cl <sup>-</sup>	962 0,0418	96 0,0025	47 0,0012	346 200	
	Вулкан Кошелева						
59	Нижнекошелевский	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	24 0,0011	10 0,00026	62 0,00155	36 34	
60	№ 7, Нижнекошелевский	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> - HCO <sub>3</sub>	58 0,0025	5 0,00014	54 0,00135	23 22	
	<b>Курильские острова</b>						
	Вулкан Эбеко на о. Парамушир						
61	№ 138, Белый Ключ	Cl <sup>-</sup> , H <sup>+</sup>	232 0,0101	42 0,0011	203 0,0051	133 112	
62	№ 143, Серый Ключ	То же	38 0,0017	23 0,0006	41 0,001	62 59	
63	№ 139, Северо-Восточное термальное поле	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> - Cl <sup>-</sup>	242 0,0106	35 0,0009	122 0,003	364 204	
64	№ 148, II Юго-Восточное термальное поле	То же	135 0,0059	6 0,00015	16 0,0004	297 187	
65	№ 155, Западное термальное поле	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	30 0,0013	2 0,00005	16 0,0004	80 76	
66	Центральная Воронка, Южный кратер	Cl <sup>-</sup> , H <sup>+</sup>	102 0,0044	92 0,0024	92 0,0023	77 73	
67	То же	То же	65 0,0028	8 0,0002	25 0,0006	221 128	
68	Верхнеюрьевский	Cl <sup>-</sup> - SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	287 0,0125	269 0,0069	344 0,0086	317 183	
	о. Шиадокотан						
69	№ 4, вулкан Синарка	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	216 0,0094	20 0,0005	329 0,0082	26 25	
70	№ 114, вулкан Кунтоминтар	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> - Cl <sup>-</sup>	1404 0,0061	16 0,0004	321 0,008	273 178	
71	Дробный	Cl <sup>-</sup>	3589 0,156	173 0,0044	195 0,0049	176 130	
72	Закатный	То же	4010 0,175	60 0,0015	346 0,0086	87 82	
	Остров Расшуга						
73	Ванны Сноу	"	954 0,0415	32 0,0008	238 0,0059	53 50	
	Остров Кетой						
74	№ 83, вулкан Кетой	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	95 0,0041	32 0,0008	95 0,0024	152 112	
	Остров Симушир						
75	№ 50, Бирюзовый, кальдера Заварицкого	Cl <sup>-</sup>	1464 0,064	86 0,0022	44 0,0011	380 213	

8	9	10	11	12	13
260	В.М. Сугробов	1,19 1,10	250	178	180
86	Е.А. Вакин	1,24 2,71	83	81	80
61	То же	1,64 2,81	60	57	56
95	Л.Н. Барабанов	1,26 2,11	197	135	143
94	В.В. Иванов	0,88 2,16	95	108	123
94	Л.Н. Барабанов	1,31 2,03	96	174	173
94	То же	1,76 2,29	94	173	167
57	"	1,60 2,18	64	116	121
100	В.В. Иванов,	0,62	120	115	133
	В.В. Аверьев	1,65			
100	К.К. Зеленов	1,44 2,39	108	144	148
95	В.В. Иванов,	0,55	105	172	188
	В.В. Аверьев	1,42			
45	Д.С. Стратула	1,52 2,57	49	65	64
67	Л.Н. Барабанов	2,22 2,38	71	170	155
79	Д.С. Стратула	1,43 1,18	92	145	151
58	Л. Н. Барабанов	1,97 1,69	69	120	122
39	То же	1,79 2,06	47	100	100
40	"	1,06 2,13	48	136	131
96	"	1,67 1,38	106	181	174

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7
76	Остров Уруп № 28, вулкан Берга	$\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$	262 0,0114	14 0,00036	382 0,0095	182 135
77	Остров Итуруп № 24, Рейдовский	То же	868 0,0378	57 0,0015	391 0,0097	106 86
78	№ 217, вулкан Баран- ского	$\text{SO}_4^{2-}$	76 0,0033	4 0,0001	13 0,00032	89 85
79	№ 223, ущелье Кипя- щей Речки	То же	42 0,0018	6 0,00015	16 0,0004	254 160
80	№ 227, там же	"	90 0,0039	2 0,00005	9 0,00022	54 51
81	№ 228, Желтое Око, там же	"	375 0,0163	40 0,001	124 0,0031	342 198
82	№ 230, Старозавод- ский	"	38 0,0017	7 0,00018	38 0,00095	156 115
83	Остров Куна- шир № 5, Нескученский	"	54 0,00235	8 0,00021	9 0,00023	178 132
84	Добрый Ключ	$\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$	327 0,0164	6 0,00017	95 0,0024	50 47
85	№ 170, Верхнестол- бовский	То же	719 0,0313	51 0,0013	132 0,0033	103 83
86	Вулкан Менде- леева № 197, СЗ термальное поле	"	74 0,0032	7 0,00018	125 0,0031	190 141
87	Нижнеменделеевский	"	1076 0,0468	60 0,00153	134 0,0033	315 182
88	Верхнедокторский	"	1297 0,0564	75 0,0019	130 0,0032	325 188
89	Горячий Пляж Нижнедокторский	$\text{Cl}^-$	838 0,0364	73 0,0018	103 0,0026	171 127
90	Провальный Колодец	$\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$	615 0,0268	74 0,0019	70 0,00175	248 165
91	Скв. 3	$\text{Cl}^-$	2437 0,1058	35 0,0009	227 0,0057	160 118
92	Скв. 4	То же	2288 0,0996	11 0,0003	150 0,00374	176 130
93	Скв. 5	"	374 0,0163	26 0,0007	96 0,0024	125 101
94	Скв. 6	"	269 0,0117	7 0,00018	22 0,00055	156 115
95	Скв. 11	"	1456 0,0634	128 0,0033	103 0,0026	166 123
96	Скв. 15	"	629 0,0273	72 0,0018	112 0,0028	169 125

8	9	10	11	12	13
40	Л.Н. Барабанов	1,81 2,74	42	148	132
68	То же	1,56 1,97	76	123	120
66	"	1,75 2,48	67	122	123
98	"	1,45 2,49	95	160	147
98	"	2,07 2,65	93	100	94
85	"	1,38 1,91	89	178	158
80	"	1,39 2,66	78	137	124
93	Р.А. Шувалов	1,31 2,13	94	146	140
68	Ю.М. Фомичев	2,15 2,62	68	97	93
81	Л.Н. Барабанов	1,47 1,73	88	120	122
50	То же	1,69 2,98	49	150	149
95	А.Б. Авдеева	1,51 1,60	101	171	168
82	Ю.М. Фомичев	1,47 1,48	91	175	173
64	То же	1,36 1,55	76	143	145
62	К.К. Зеленов	1,21 1,40	76	162	161
142	И.И. Ризнич	2,01 1,82	137	138	135
175	То же	2,48 2,27	156	145	133
60	"	1,55 2,03	67	131	128
263	"	1,82 1,92	236	137	135
150	И.А. Пляшкун	1,26 1,16	154	140	148
88	То же	1,27 1,56	97	142	144

Таблица 1 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7
97	Скв. 16	$\text{SO}_4^{2-}-\text{Cl}^-$	711 0,031	42 0,0011	122 0,003	338 196
	Вулкан Головинина					
98	Оз. Кипящее	То же	338 0,0147	32 0,00056	93 0,0023	172 127
99	№ 245, берег оз. Кипящее	"	69 0,003	5 0,000013	36 0,0009	184 136
100	№ 427, там же	"	239 0,0104	20 0,00052	112 0,0028	169 125
101	Источник на IV термальном поле, там же	"	245 0,0107	31 0,0008	117 0,0029	144 126
102	Источник на Центральном Западном куполе	"	40 0,0017	5 0,000013	61 0,0015	647 256
103	Источник у Черепаховой структуры	$\text{SO}_4^{2-}$	18 0,0008	3 0,000008	76 0,0019	460 244
104	Источник на Внешнем куполе	То же	43 0,0019	11 0,00028	147 0,0037	342 198
105	№ 247, Алехинский в Серной бухте	$\text{SO}_4^{2-}-\text{Cl}^-$	166 0,0072	10 0,00026	90 0,0022	62 59
106	№ 263, Северо-Алехинский	То же	200 0,0087	18 0,00046	156 0,0039	62 59

Данное уравнение (7) действительно для  $T$  от 2 до  $372^\circ\text{C}$  и позволяет рассчитать температуру с точностью до  $\pm 15^\circ$ . В верхней части графика для удобства отсчетов дана шкала температур в  $^\circ\text{C}$ , проявляющаяся в логарифмической форме.

На графике отложены значения зависимости  $\lg N$  от температур *in situ* (см. табл. 1, колонка 8), т.е. измеренных на месте: для источников — на их выходах, а для геотермальных скважин — на устье, в стволе или рассчитанных по энтальпии пароводяной смеси (ПВС). В целом наблюдается некоторый разброс точек по обе стороны от равновесной линии, хотя подавляющее большинство точек (больше 90%) укладывается в нормы указанной выше точности данного гидрохимического геотермометра. В меньшей степени разбросаны точки, отражающие воды паужетского типа, вскрываемые скважинами (рис. 1, см. вкл.).

Равновесная линия позволяет прибегнуть к уточнению температуры водного раствора с учетом данного соотношения ионов  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{Ca}^{2+}$  (см. уравнения (5) и (7)). От точек к линии равновесия проведены нормали, пересечения которых с ней дают уточненные цифры температур, отвечающих данному гидрохимическому геотермометру (см. табл. 1, колонка 11).

Сопоставление фактических температур с таковыми по показаниям  $\text{K}-\text{Na}-\text{Ca}$  геотермометра (рис. 2) показывает близкое их совпадение,

8	9	10	11	12	13
61	Ю.М. Фомичев	1,38 1,78	70	177	168
36	Л.Н. Барабанов	1,59 2,11	45	143	136
92	То же	2,70 3,70	—	148	132
92	К.А. Скрипко	1,53 2,23	92	142	140
54	С.С. Сидоров	1,37 2,07	62	142	148
97	То же	2,58 3,93	—	193	107
85	"	2,66 4,40	—	190	164
97	"	1,32 2,83	91	178	178
51	Л.Н. Барабанов	1,72 2,54	54	107	100
54	То же	1,57 2,44	58	107	101

в особенности для вод скважин на геотермальных месторождениях Паужетка и Горячий Пляж. Что касается источников, то лишь в отдельных из них (в 10% случаев) разность температур превышает 15–20°. Степень отклонения температур в скважинах и источниках (см. рис. 2) от геотермометрических температур позволяет установить степень равновесности процесса выщелачивания горных пород термальными водами. А это, в свою очередь, позволяет сделать соответствующие выводы не только о формировании вод в условиях указанного процесса, но и в условиях смешения глубинных вод с верхними холодными водами. Для рассмотрения этих вопросов необходимо проанализировать возможности других гидрохимических методов при геотермальных исследованиях.

### Гидрохимический силикатный геотермометр

Равновесие растворенной в термальных водах кремнекислоты с различными модификациями кварца в горных породах (кристобалитом, тридимитом, халцедоном и др.) позволяет применить относительно простой метод определения температуры глубинных вод. К нему в разные годы обращались многие исследователи, однако часто результаты не давали желаемого эффекта в силу трудностей определения температурных точек насыщения вод при наличии в них разных форм кремнекислоты, количественно меняющихся с изменением температуры. Кроме того, затруднения

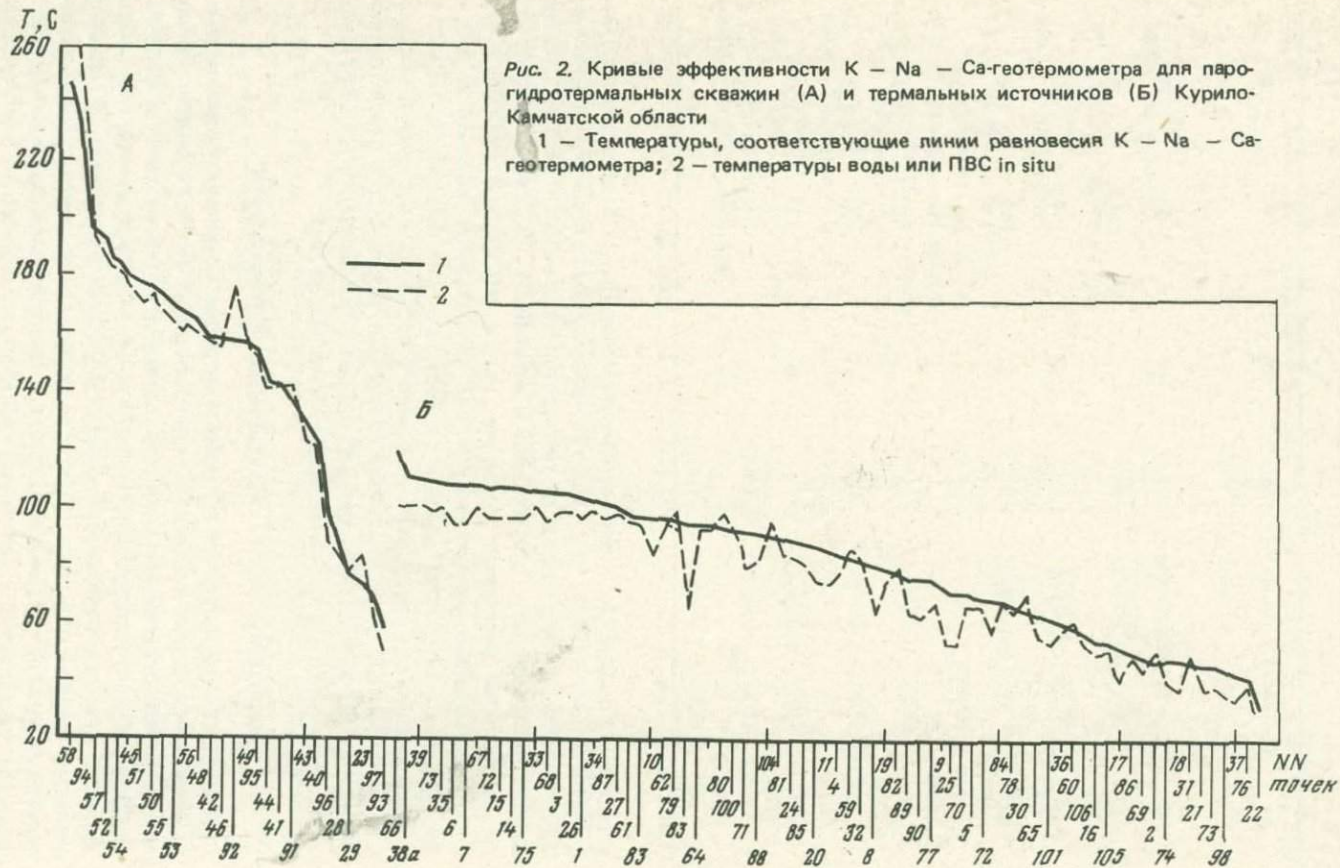
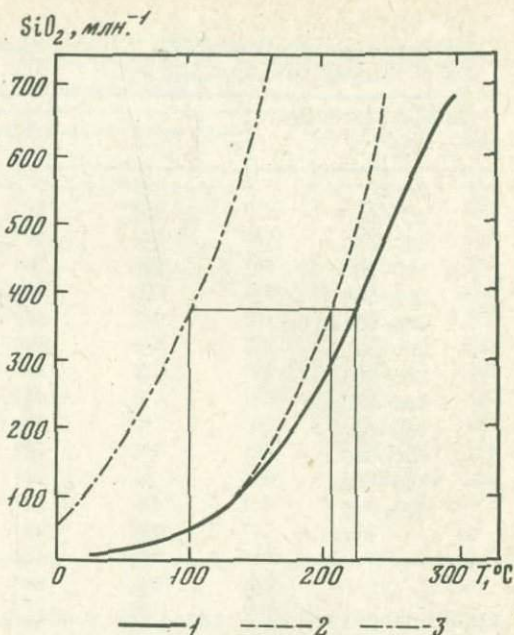


Рис. 3. Растворимость в воде кремнекислоты в зависимости от температуры (по Р.О. Фурнье и Дж. Дж. Роу (1966) с изменениями А.Х. Трюсделла и Р.О. Фурнье (1974))

1 — Кривая растворимости кварца; 2 — содержание  $\text{SiO}_2$  в растворе после того, как первоначально насыщенный кварцем раствор охладится адиабатически до  $100^\circ\text{C}$  без какого-либо осаждения  $\text{SiO}_2$ ; 3 — растворимость аморфной кремнекислоты



связаны с тем, что температура в источниках сильно занижена из-за разбавления терм грунтовыми водами и возможным выпадением в осадок силикатов.

Этот вопрос был рассмотрен Р.О. Фурнье и Дж. Роу (Fournier, Rowe, 1966, p. 694). На графике содержания  $\text{SiO}_2$  от температуры, отражающем взаимодействие водного раствора с кварцем горной породы (рис. 3), кривая 2 отражает равновесное состояние при адиабатическом охлаждении раствора (т.е. при охлаждении с пароотделением или образованием газовой фазы), а кривая 1 — при кондуктивном охлаждении, когда допускается лишь слабое пароотделение.

В 1974 г. А.Х. Трюсделл и Р.О. Фурнье модернизировали график и в том отношении, что нанесли на него кривую растворимости аморфной кремнекислоты (кривая 3 на рис. 3). Если взять, к примеру, термальную воду естественного кипящего источника с  $T 100^\circ\text{C}$ , то в ней предел растворимости аморфной  $\text{SiO}_2$  составит  $370 \text{ млн.}^{-1}$ . Этому же значению неаморфной кремнекислоты в воде, равновесной с кварцем, соответствуют значения  $T 206^\circ\text{C}$  при адиабатическом охлаждении раствора или  $226^\circ\text{C}$  при кондуктивном охлаждении. На рис. 3 это отражено прямыми линиями внутри графика. Таким образом, новизна этого графика состоит в том, что при вычислении температур можно исключить влияние аморфной кремнекислоты, которая при осаждении из воды образует скрытокристаллические формы кремнезема (опал и т.п.).

По сведениям из работ Л.Н. Барабанова и В.Н. Дислера (1968, с. 38) и Г.Ф. Пилипенко (1974, с. 86) содержание коллоидной  $\text{SiO}_2$  в азотных и азотно-углекислых термах гранитных массивов и современной вулканической области СССР колеблется в пределах от 5 до 50%. Это в целом соответствует данным, отраженным на упомянутом графике (см. рис. 3).



Таблица 2

Распределение содержаний  $\text{SiO}_2$  в термах Камчатки и Курильских островов и доля содержания коллоидной  $\text{SiO}_2$

Градации содержаний $\text{SiO}_2$ млн <sup>-1</sup>	Количество точек	% распределения	Средняя доля коллоидной $\text{SiO}_2$ , %
0-50	3	2,8	—
50-100	17	16,0	5
100-150	13	12,3	19
150-200	25	23,6	26
200-250	11	10,4	33
250-300	11	10,4	37
300-350	18	17,0	42
350-400	6	5,7	44
400-450	—	—	—
450-500	1	0,9	47
500-550	—	—	—
550-600	—	—	—
600-650	1	0,9	60
Всего	106	100,0	—

Доля коллоидной  $\text{SiO}_2$  возрастает с повышением температуры (табл. 2). Материалы этой таблицы показывают распределение содержаний  $\text{SiO}_2$  в анализируемых нами водах источников и скважин. По содержанию  $\text{SiO}_2$  в водах с учетом коллоидной части  $\text{SiO}_2$  (см. табл. 1, колонка 7, нижняя строка) на графике силикатного геотермометра (рис. 3, кривая 1) отсчитываются температуры, отражающие условия формирования парогидротерм на глубине при их адиабатическом охлаждении во время подъема к земной поверхности (см. табл. 1, колонка 12). Для удобства пользования графиком данные силикатного геотермометра представлены в табл. 3.

Отсчет по силикатному геотермометру требует предварительной оценки условий формирования и проявления термальных источников и гейзеров. В этом отношении Р.О. Фурнье, Д.Э. Уайт и А.Х. Трюсделл (Fournier, White, Truesdell, 1974) рекомендуют подразделять их по признакам температуры и дебита.

Для гейзеров и кипящих источников с  $T > 100^\circ\text{C}$  и малым дебитом (до 2 кг/с) расчет ведется при кондуктивном охлаждении, а с большим дебитом — при адиабатическом охлаждении с максимальным отделением пара. Эти условия нами приняты для проводимых ниже расчетов температуры формирования источников и геотермальных скважин Паужетки и Горячего Пляжа. Для источников с  $T < 100^\circ\text{C}$  при низком расходе (до 0,3 кг/с) расчеты рекомендуется проводить при кондуктивном охлаждении их горячеводной составляющей, при этом индифицируемые температуры следует считать минимальными. Для источников с  $T < 100^\circ\text{C}$  и большим дебитом расчеты надо вести по адиабатическому охлаждению горячеводной компоненты. Получаемые по  $\text{K-Na-Ca}$  геотермометру температуры источников могут иметь точность  $\pm 25^\circ$ , что отмечается и по нашим данным (см., например, точку 25 в табл. 1). Вполне вероятно, что здесь надо учитывать кондуктивное охлаждение горячеводной составляющей. С

Таблица 3

Силикатный геотермометр для проявлений термальных источников и парогидротерм Курило-Камчатской области (зависимость температуры среды от содержания в водах ионной и мономолекулярной  $\text{SiO}_2$ )

$\text{SiO}_2$ , млн	$T$ , °C	$\text{SiO}_2$ , млн	$T$ , °C	$\text{SiO}_2$ , млн	$T$ , °C	$\text{SiO}_2$ , млн	$T$ , °C
20	55	105	133	190	175	275	202
25	65	110	135	195	177	280	203
30	75	115	137	200	178	290	207
35	82	120	139	205	179	300	210
40	92	125	142	210	181	310	212
45	96	130	145	215	182	320	215
50	100	135	148	220	184	330	218
55	104	140	150	225	185	340	220
60	108	145	152	230	186	350	222
65	111	150	154	235	187	360	224
70	114	155	157	240	188	370	226
75	116	160	160	245	190	—	—
80	118	165	162	250	192	—	—
85	122	170	165	255	193	—	—
90	125	175	168	260	195	—	—
95	128	180	171	265	197	—	—
100	131	185	173	270	200	—	—

учетом этих положений рекомендуется провести более подробный анализ данных о температурах источников по K—Na—Ca- и  $\text{SiO}_2$ -геотермометрам.

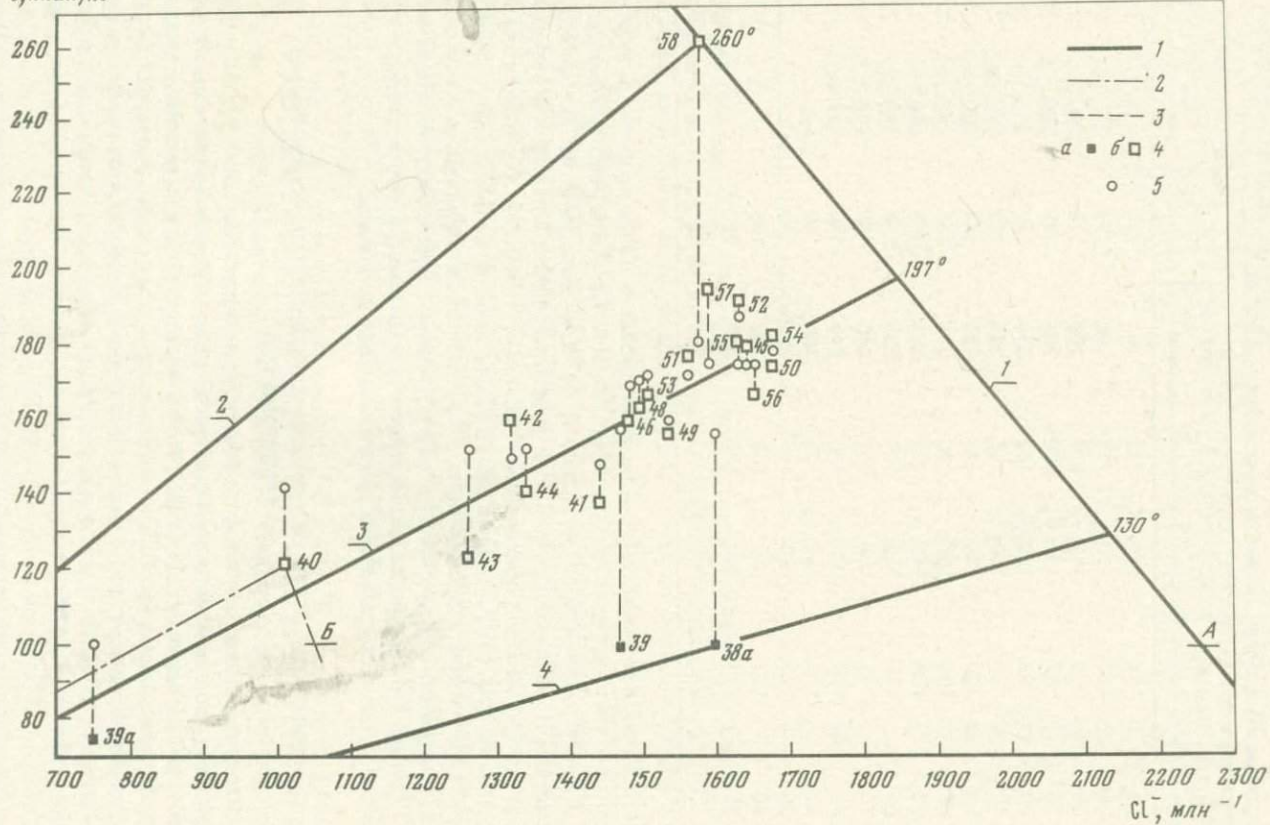
Данные силикатного геотермометра для большинства источников, естественно, вызывают сомнения в их достоверности. Однако, как показывают другие методы определения глубинных температур, о которых сказано дальше (см. рис. 7 и 8), в ряде случаев можно принимать эти температуры во внимание, в особенности, если они проконтролированы K—Na—Ca-геотермометром. Для скважин геотермальных месторождений Паужетка и Горячий Пляж данные силикатного геотермометра почти совпадают с температурами вскрываемых на глубине перегретых вод.

### Гидрохимический силикатно-калий-натрий-кальциевый геотермометр

Этот геотермометр построен в виде графика (рис. 4, см. вкл.) по тому же принципу, что и демонстрируемый выше график K—Na—Ca-геотермометра. Изменение сводится лишь к тому, что по оси абсцисс здесь отложены температуры, полученные по  $\text{SiO}_2$ -геотермометру, т.е. из табл. 3, а не фактически замеренные в источниках или скважинах. В целом этот график мало отличается от предыдущего подобного ему графика. Точки здесь почти так же рассеяны по обе стороны линии равновесия, отвечающей уравнению (6).

Отмечается почти прежнее положение точек, соответствующих геотермальным скважинам Паужетки и Горячего Пляжа в силу совпадения силикатных температур с измеренными на месте (или определенными по

$J, \text{ккал/кг}$



энтальпии ПВС). Кроме того, отмечается переход большинства точек, в особенности сульфатно-хлоридных вод Курильских островов на поле выше равновесной линии в связи со смещением их вправо, вызванный резким для них увеличением силикатных температур.

Гидрогеохимические  $K-Na-Ca$  и  $SiO_2-K-Na-Ca$ -геотермометры рассчитаны и основаны на эмпирически установленной закономерности изменений концентраций соответствующих компонентов в термальных водах. В целом эти геотермометры отражают усредненные условия формирования гидротерм в контакте с вмещающими породами андезитового и андезитобазальтового составов. Точность  $K-Na-Ca$ -геотермометра, равная  $\pm 15^\circ$ , удовлетворяет исследованиям гидротерм на стадии их поисков и предварительной разведки.

### Гидрохимический хлоридный геотермометр

Одним из путей определения подземной температуры является расчет гидрохимических показателей с учетом изменения термодинамических условий в недрах. Основные теоретические предпосылки и возможности этих расчетов изложены в работах Р.О. Фурнье и А.Х. Трюсделла (Fournier, Truesdell, 1974; Truesdell, Fournier, 1975). Требования для подобного расчета включают: 1) необходимость сохранения паровой фазы глубинных горячих вод перед их смешением с холодными водами; 2) температуры в результате смешения лежат в пределах, соответствующих силикатному геотермометру (обычно  $150-205^\circ C$ ); 3) после смешения вод кремниевая кислота не должна выпадать в осадок; 4) до и после смешения не должна иметь место потеря кондуктивного тепла. Данной модели удовлетворяют условия большинства гидротермальных систем в областях современного вулканизма с водами паужетского типа. Распределение основных растворенных макрокомпонентов ( $Cl^-$ ,  $SiO_2$  и др.) в горячих водах зависит от степени разбавления холодными водами. В отношении  $SiO_2$  надо отметить, что в процессе смешения флюидов с холодными водами кремниевая кислота в водах источников становится резко неравновесной с кремневыми минералами. Для недр гидротермальных систем это явление не столь выражено, и расчеты по  $SiO_2$  почти также правомерны, как и по  $Cl^-$ .

Расчет образования парогидротерм (и термальных вод) в результате смешения глубинного высокотемпературного флюида и холодной грунтовой воды может быть проведен графическим и аналитическим методами.



Рис. 5. Графическая модель смешения парогидротерм Паужетского месторождения. Сопоставление энтальпии пароводяной смеси и содержания  $Cl^-$  в водах источников и скважин

1 — Линии сопоставления (1 — линия энтальпий, соединяющая точку предполагаемой максимальной энтальпии глубинного флюида в  $639 \text{ ккал/кг}$  при содержании  $Cl^-$  в  $10 \text{ млн}^{-1}$  с точкой А; 2, 3 и 4 — максимальная, средняя и минимальная линии разбавления терм); 2 — линия разбавления глубинного флюида в точке 40 (доля глубинного флюида выражается отношением отрезка линии от точки 40 до точки Б к отрезку линии от точки 40 до начала координат); 3 — линии, соединяющие точки наблюдений с точками их температур по  $SiO_2 - K - Na - Ca$  геотермометру; 4 — точки наблюдений (а — источники, б — скважины); 5 — точки температур по  $SiO_2 - K - Na - Ca$  геотермометру

Таблица 4

Температура и доля глубинной составляющей парогидротерм Паужетского геотермального месторождения

№ п. п. в таблице 1	Источник, скважина	Температура				Доля глубинной составляющей, X				Дебит ПВС при давлении на устье 2 атм, кг/с
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
38а	Гейзер 1	100	111	156	130	0,14	0,60	0,48	0,09	0,4
39	Парящий 1	100	110	158	138	0,14	0,55	0,51	0,12	10,0
39а	Камбальный	75	—	—	178	0,10	0,28	—	—	0,5
40	Скв. Р-1	122	123	143	209	0,18	0,37	0,43	0,11	2,0
41	Скв. 1	139	142	148	181	0,20	0,53	0,44	0,14	1,7
42	Скв. 4	160	158	150	211	0,24	0,49	0,44	0,23	33,0
43	Скв. 5	123	129	154	181	0,18	0,58	0,48	0,09	2,3
44	Скв. 6	141	143	152	193	0,21	0,50	0,46	0,15	5,1
45	Скв. 7	180	180	175	200	0,27	0,61	0,66	0,26	3,0
46	Скв. 8	159	158	169	196	0,25	0,55	0,60	0,21	6,8
47	Скв. 9	—	—	168	—	—	—	0,59	—	—
48	Скв. 10	164	167	170	199	0,24	0,56	0,60	0,27	7,2
49	Скв. 11	157	156	159	189	0,23	0,57	0,53	0,20	16,6
50	Скв. 12	175	176	178	193	0,26	0,62	0,70	0,19	6,0
51	Скв. 13	177	178	172	204	0,27	0,58	0,62	0,26	15,3
52	Скв. 14	190	193	189	208	0,29	0,61	0,78	0,30	17,0
53	Скв. 15	166	169	172	200	0,25	0,56	0,63	0,23	14,8
54	Скв. 16	182	184	179	197	0,27	0,62	0,70	0,22	20,2
55	Скв. 17	181	174	175	202	0,27	0,61	0,65	0,26	9,5
56	Скв. 18	166	167	174	188	0,25	0,61	0,67	0,18	5,8
57	Скв. 20	194	195	175	214	0,29	0,59	0,64	0,31	9,1
58	Скв. 21	260	250	180	260	0,41	0,59	0,70	0,52	5,2
									Всего	191,5

Примечание. I — Энтальпия воды или ПВС, ккал/кг; II — по К — Na — Са-геотермометру, °С; III — по силикатно — К — Na — Са-геотермометру, °С; IV — по хлоридному геотермометру, °С (по графикам на рис. 5 и 6; данные на линии энтальпии); V — расчет по энтальпии (см. уравнение 11); VI — то же, по содержанию  $Cl^-$  (уравнение (12)); VII — то же, по содержанию неколлоидной  $SiO_2$  (уравнение (13)); VIII — расчет по графикам сопоставления энтальпии и содержания  $Cl^-$  (рис. 5 и 6).

Таблица 5

Температура и доля глубинной составляющей парогидротерм Горячего Пляжа (о. Кунашир)\*

№ п/п в таблице 1	Источник, сква- жина	Температура				Доля глубинной составляющей, X				Дебит при дав- лении на устье 1 атм, кг/с
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
87	Нижнемен- делеевский	95	101	168	202	0,14	0,32	0,63	0,45	7,0
88	Верхнедок- торский	82	91	173	169	0,11	0,35	0,65	0,33	3,0
89	Нижнедок- торский	64	76	145	166	0,09	0,27	0,41	0,33	0,5
90	Провальный колодец	62	76	161	149	0,08	0,30	0,56	0,25	2,5
91	Скв. 3	142	137	135	142	0,21	0,83	0,37	0,21	6,0
92	Скв. 4	175	156	133	175	0,26	0,77	0,42	0,35	7,5
—	Скв. 2а	150	—	—	180	0,22	0,62	0,30	0,37	23,0
—	Скв. 1	53	—	—	224	0,07	0,13	0,85	0,60	—
—	Скв. 2	144	—	—	345	0,20	0,18	—	0,32	15,0
93	Скв. 5	60	67	128	235	0,08	0,15	0,30	0,54	—
94	Скв. 6	263	236	135	465	0,43	0,10	0,36	0,64	12,0
95	Скв. 11	150	154	148	209	0,22	0,50	0,39	0,31	15,0
96	Скв. 15	88	97	144	251	0,12	0,20	0,40	0,58	—
97	Скв. 16	61	70	168	161	0,08	0,26	0,68	0,30	—
—	Скв. 12а	150	—	—	150	0,22	—	0,43	0,22	10,0
									Всего	88,5

\* См. примечание к табл. 4

Графический метод изложен в работе А.Х. Трюсделла и Р.О. Фурнье (1975) и представляет собой сопоставление данных о содержаниях  $\text{Cl}^-$  в термальных и перегретых водах и об энтальпиях воды источников и пароводяных смесей, полученных из скважин (рис. 5). На графике отражается содержание  $\text{SiO}_2$  в термах в виде значений температур, полученных по  $\text{SiO}_2$ -K-Na-Ca-геотермометру. Данный график назван "гипотетическим", поскольку он не является функциональным и не отражает точной зависимости содержания  $\text{Cl}^-$  или  $\text{SiO}_2$  от энтальпии глубинного флюида, на нем можно лишь наглядно демонстрировать суть разбираемого процесса.

На графике смешения парогидротерм Паужетского месторождения (см. рис. 5) температуры глубинных составляющих, снимаемые с линии энтальпии от точки 50 до А, равны соответственно от 130°C (т. 38а, Гейзер 1) до 260°C (т. 58, энтальпия ПВС, скв. 21). Доля глубинного флюида (или глубинной горячеводной компоненты) вычисляется как частное от деления отрезка прямой от точки наблюдения до уровня энтальпии в 100 ккал/кг (например, для т. 40 линия от этой точки до т. Б) к отрезку "линии разбавления" от т. 40 до "нулевой" точки холодной воды с энтальпией 10 ккал/кг и содержанием  $\text{Cl}^-$  10 млн<sup>-1</sup>.

Расчетные данные сведены в табл. 4 и 5 соответственно для Паужетского и Горячепляжного месторождений. В колонках 6 обеих таблиц указаны температуры недр, полученные на линии энтальпии, т.е. по соотношению энтальпии и  $\text{Cl}^-$ .

В колонках 10 табл. 4 и 5 отражены доли глубинного флюида, рассчитанные указанным выше графическим способом. Доля глубинной составляющей в Паужетке колеблется в пределах от 9 до 52%, а на Горячем Пляже — от 21 до 60%. В количественном выражении расходов глубинных флюидов это составляет приблизительно 50 кг/с для Паужетки и около 30 кг/с для Горячего Пляжа.

### Расчеты смешения термальных вод

Более точные данные могут быть получены при применении аналитических методов решения, основанных на известных формулах смешения многокомпонентных растворов. По А.Х. Трюсделлу и Р.О. Фурнье (1975), можно написать уравнения баланса тепла и  $\text{Cl}^-$  для очага разгрузки парогидротерм. Мы считаем возможным составить подобное уравнение и для  $\text{SiO}_2$ .

В смеси глубинной горячей воды с холодной водой соблюдаются следующие равенства:

$$I_{\text{см}} = x I_{\text{гор}} + (1 - x) I_{\text{хол}} \quad (8)$$

$$\text{Cl}_{\text{см}}^- = x \text{Cl}_{\text{гор}}^- + (1 - x) \text{Cl}_{\text{хол}}^- \quad (9)$$

$$\text{SiO}_{2\text{см}} = x \text{SiO}_{2\text{гор}} + (1 - x) \text{SiO}_{2\text{хол}} \quad (10)$$

В этих равенствах приняты обозначения: см — смесь горячей и холодной воды; гор — горячеводная составляющая (или компонента); хол —

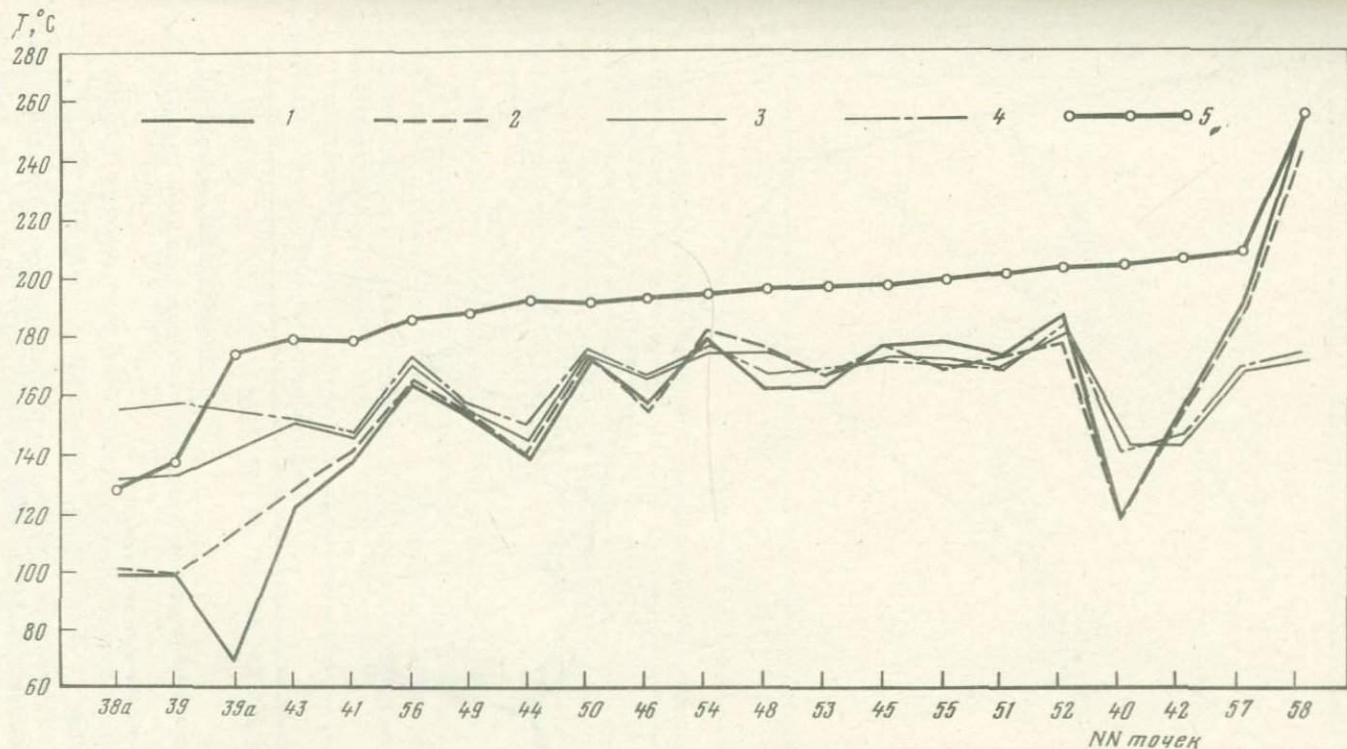


Рис. 6. Диаграмма температур Паужетского геотермального месторождения

1 — в источниках и фонтанирующих скважинах по данным замеров; 2 — в зонах вскрытия парогидротерм по К — Na — Ca геотермометру; 3 — там же, по силикатному геотермометру; 4 — там же, по SiO<sub>2</sub> — K — Na — Ca геотермометру; 5 — в зонах формирования парогидротерм — по хлоридному геотермометру



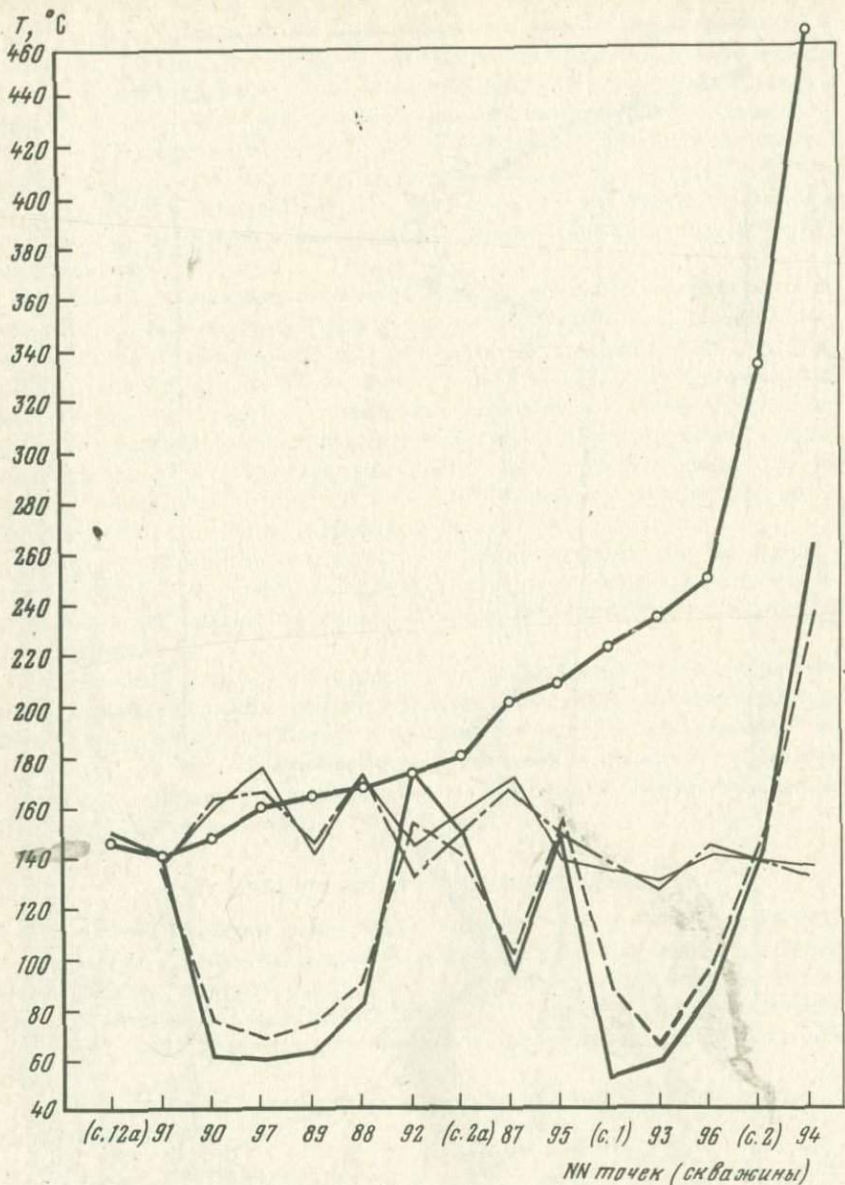


Рис. 7. Диаграмма температур парогидротермального месторождения Горячий Пляж, о. Кунашир.

Условные обозначения см. на рис. 5

холодная вода ( $I = 10$  ккал/кг,  $Cl^- = 10$  млн<sup>-1</sup> и  $SiO_2 = 25$  млн<sup>-1</sup>). Энтальпия горячеводной компоненты приравнивается к таковой глубинного флюида. При снижении температуры от 327 до 100°С энтальпия отделяемого от воды пара может варьировать от 615 до 647 ккал/кг, нами

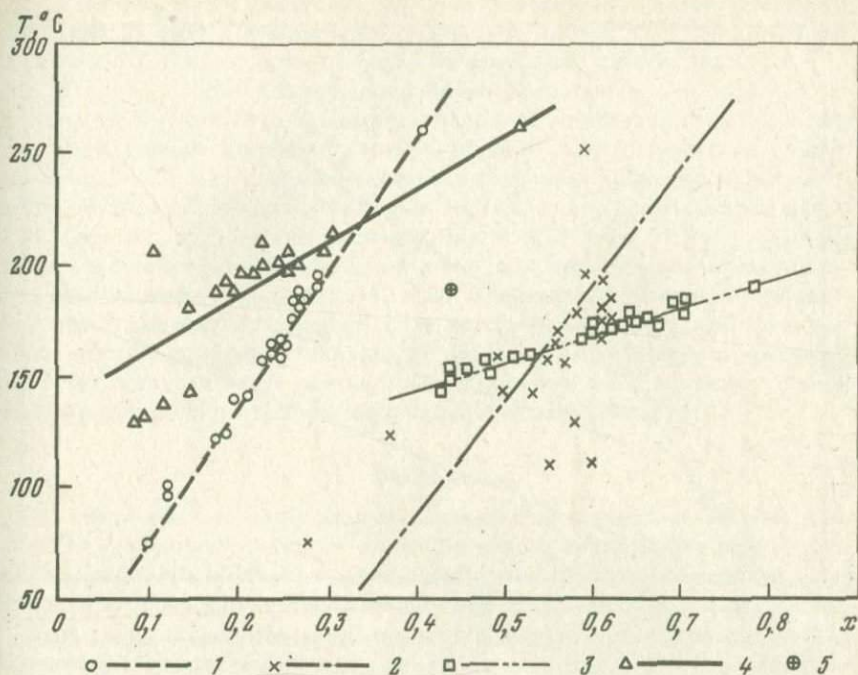


Рис. 8. Температура и доля глубинной составляющей Паужетских парогидротерм. Линии, полученные расчетами (см. табл. 4): 1 — снижения энтальпии ПВС (температура взята по K—Na—Ca геотермометру); 2 — смешения вод по степени разбавления  $Cl^{-1}$  (температура по энтальпии ПВС); 3 — смешения вод по степени разбавления  $SiO_2$  (температура взята по  $SiO_2$ —K—Na—Ca геотермометру); 4 — графическим методом (температура взята по хлоридному геотермометру); 5 — средняя точка смешения глубинных и холодных вод

принято промежуточное значение в 639 ккал/кг. Максимумы содержаний  $Cl^{-}$  на диаграммах (рис. 5) определяются для вод Паужетки  $2680 \text{ млн}^{-1}$ , для Горячего Пляжа —  $5170 \text{ млн}^{-1}$  (для скв. 12а —  $6750 \text{ млн}^{-1}$ ). Максимальное содержание неколлоидной  $SiO_2$  с некоторой долей условности принято равным  $275 \text{ млн}^{-1}$ .

Подставляя принятые постоянные величины, получим уравнения для расчетов доли глубинной составляющей:

$$X = (I_{\text{см}} - 10) / 629, \quad (11)$$

$$X = (Cl_{\text{см}}^{-} - 10) / 2670 \text{ (или 5160)}, \quad (12)$$

$$X = (SiO_{2\text{см}} - 25) / 250. \quad (13)$$

Данные расчетов глубинной составляющей парогидротерм Паужетки и Горячего Пляжа по уравнениям (11) — (13) зафиксированы в табл. 4 и 5.

На рис. 6 и 7 представлены сводные данные температур по точкам наблюдений Паужетского и Горячепляжного парогидротермальных месторождений. Отчетливо видно, что температура, определенная графическим

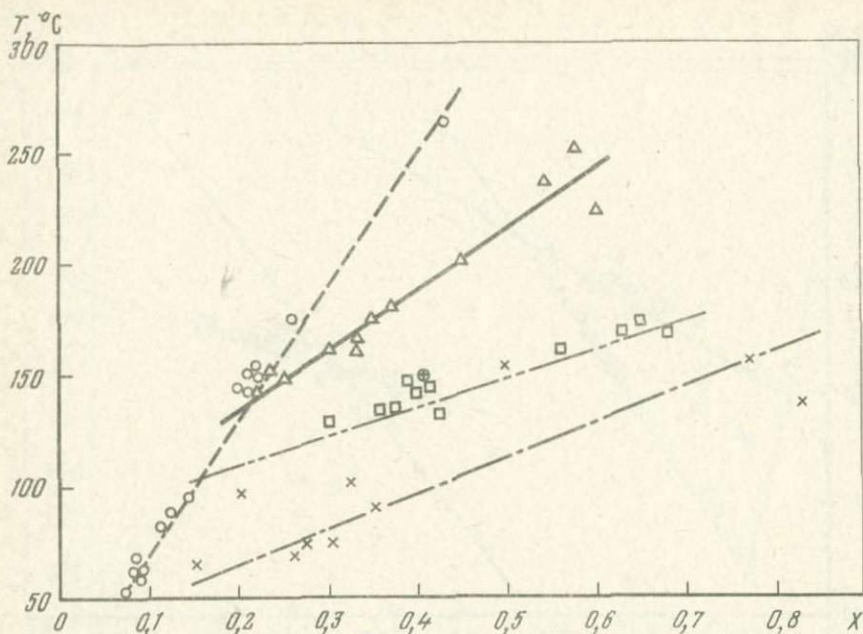


Рис. 9. Температура и доля глубинной составляющей парогидротерм Горячего Пляжа, о. Кунашир

Условные обозначения см. на рис. 8

методом (т. е. по сопоставлению энтальпии и содержания  $\text{Cl}^-$ ), сильно отличается от всех других температур: непосредственных измерений, по К—Na—Са, силикатному и силикатно—калий—натрий—кальциевому геотермометрам. В источниках и низкотемпературных скважинах (ниже  $100^\circ\text{C}$  на выходе или на устье) обособляются пары линий, выделенные по содержанию  $\text{SiO}_2$ , в отличие от линий по фактическим замерам и К—Na—Са-геотермометру. Отсюда можно заключить, что наиболее представительен гидрохимический калий—натрий—кальциевый геотермометр. Поэтому именно температуры, полученные по нему, положены в основу расчета доли глубинной составляющей по степени снижения энтальпии ПВС (табл. 4 и 5, колонки 7).

Температурная кривая, рассчитанная по хлоридному геотермометру, резко обособлена от обеих охарактеризованных пар температурных кривых и особенно в правой части диаграммы для Горячего Пляжа. Воздымание кривой до  $T\ 465^\circ\text{C}$  (см. рис. 7) связано, во-первых, с некоторой условностью построения графика сопоставления энтальпии и  $\text{Cl}^-$ , во-вторых, при высоких значениях энтальпии из-за большого процентного содержания пара в ПВС и низкого содержания  $\text{Cl}^-$  линия смешения может резко сместиться влево и температуры ПВС могут быть искажены.

Данные о рассчитанных долях глубинной горячеводной компоненты отражены на графиках их зависимости от температуры отдельно для парогидротерм Паужетки (рис. 8) и Горячего Пляжа (рис. 9). В

обоих случаях линии указанной зависимости занимают разное положение. Обращает на себя внимание приблизительно одинаковое для Паужетки и Горячего Пляжа положение средней точки, если суммировать все данные. Эта точка соответствует доле глубинной составляющей в 0,40–0,45. Данные по K–Na–Ca-геотермометру, наиболее представительны, поэтому в основу оценки следует положить крайние слева линии равновесия (см. рис. 8 и 9) в точках их пересечения с линиями хлоридного геотермометра. В этом случае доля глубинной составляющей для Паужетки равна 0,34 (или 65 кг/с), а для Горячего Пляжа 0,24 (или 21 кг/с). Данные оценки приходится на оптимальные для обоих месторождений температуры, находящиеся в пределах 140–220°C. Расчетные данные о разбавлении парогидротерм по содержанию в них  $\text{Cl}^-$  и  $\text{SiO}_2$  не однозначны для обоих месторождений, что связано, во-первых, с различной концентрацией  $\text{Cl}^-$  в тех и других водах и, во-вторых, с принятой нами ориентировочной максимальной концентрацией неколлоидной кремнекислоты.

### Выводы

1. Теоретические предпосылки использования гидрохимических данных для изучения физических условий в недрах гидротермальных систем базируются на достижении равновесия при взаимодействии водных растворов повышенной температуры с вмещающими горными породами.

2. В качестве гидрохимических геотермометров могут быть применены содержания в водах отдельных компонентов ( $\text{SiO}_2, \text{Cl}^-$ ) или же устойчивые соотношения ионов ( $\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Ca}^{2+}$  и др.), формирующиеся в результате катионного обмена в системе вода–минералы горных пород.

3. Геотермометрические методы, основанные на графоаналитических расчетах концентраций химических элементов (ионов) с учетом энтальпии глубинных парогидротерм и смешения термальных вод, при определенных условиях позволяют дать оптимальную характеристику температур в недрах гидротермальных систем и определить долю глубинной составляющей парогидротермальных месторождений в области современного вулканизма.

4. Пример обзорного рассмотрения парогидротерм Курило-Камчатской вулканической области показывает наибольшую близость к фактическим температурам температур, определяемых с помощью калий–натрий–кальциевого геотермометра, отражающего равновесие водных растворов указанных элементов с плагиоклазами вулканогенных пород андезитового и андезитобазальтового составов. В ряде случаев уточнение температур может быть проведено по силикатному и силикатно – K–Na–Ca-геотермометрам.

5. В недрах гидротермальных систем типа Паужетки и Горячего Пляжа температуры могут быть определены также с помощью силикатного геотермометра. Показания хлоридного геотермометра точнее для более высокотемпературных (150–250°C) парогидротерм по сравнению с низкотемпературными.

6. Расчеты смешения термальных вод в гидротермальных системах в сочетании с гидрогеохимической геотермометрией позволяют определить долю глубинной составляющей (или горячеводной компоненты) парогид-

ротерм, которая по данным графо-аналитических расчетов на основании материалов разведочных работ первой очереди составляет для Паужетского геотермального месторождения 0,34 (или 65 кг/с), для месторождения парогидротерм Горячий Пляж 0,24 (или 21 кг/с).

#### Условные обозначения

- $\beta$  — коэффициент в уравнении (5), равный 1/3 для  $T > 100^\circ\text{C}$  и 4/3 для  $T < 100^\circ\text{C}$ ;
- $c$  — концентрация, г/л, мг/л (млн<sup>-1</sup>);
- $\gamma$  — коэффициент активности иона или соединения;
- $\Delta H^\circ_{(T)}$  — стандартная теплота реакции при данной температуре, ккал/моль;
- $I$  — энтальпия (теплосодержание) воды или пароводяной смеси (ПВС), ккал/кг;
- $K$  — константа равновесия реакции (см. уравнение (2)), равная  $m\text{Na}/m\text{K}$ ;
- $m$  — молярность иона или соединения, г. моль/л;
- $N$  — константа равновесия реакции взаимодействия ионов  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{Ca}^{2+}$  (см. уравнение (3));
- $T^\circ\text{C}$  — температура в градусах Цельсия;
- $\text{TK}$  — абсолютная температура в градусах Кельвина;
- $X$  — доля глубинной составляющей (или горячеводной компоненты) парогидротерм;
- $x, y$  — координаты графиков (см. рис. 1 и 5);
- $x, y$  — стехиометрические коэффициенты в уравнениях (3) и (4).

#### Л и т е р а т у р а

- Аверьев В.В., Вакин Е.А.* Термальные поля вулканического массива Большой Семьячик. — Бюл. вулканол. станций, 1966, № 42, с. 3–16.
- Барабанов Л.Н., Дислер В.Н.* Азотные термы СССР, М.: Изд-во Центр. ин-та курортологии и физиотерапии, 1968, 119 с.
- Вакин Е.А.* Азгские термоминеральные источники на Камчатке. — Бюл. вулканол. станций, 1966, № 41, с. 35–40.
- Дубик Ю.М., Меняйлов И.А.* Газогидротермальная деятельность кальдеры Ксудач. — Бюл. вулканол. станций, 1971, № 47, с. 40–43.
- Иванов В.В.* Основные закономерности формирования и распределения термальных вод Камчатки. — В кн.: Молодой вулканизм СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1958.
- Иванов В.В.* Основные закономерности распространения и формирования термальных вод Дальнего Востока СССР. — В кн.: Вопросы формирования и распространения минеральных вод СССР. М., 1960, с. 171–260.
- Иванов Б.В., Шувалов Р.А.* Современная гидротермальная деятельность в районе Карымского вулкана. — Бюл. вулканол. станций, 1971, № 47, с. 65–68.
- Кирсанова Т.П.* Гидротермы Киреунской долины в Среднем хребте Камчатки. — В кн.: Вулканизм и глубины Земли. М.: Наука, 1971, с. 239–246.
- Кононов В.И.* Влияние естественных и искусственных очагов тепла на формирование химического состава подземных вод. М.: Наука, 1965, 146 с.
- Кононов В.И., Поляк Б.Г.* Большие Банные источники на Камчатке. — В кн.: Гидрогеотермические условия верхних частей земной коры. М.: Наука, 1964, с. 52–71.
- Манухин Ю.Ф., Воробьев В.И., Ворожейкина Л.Д., Мальцева К.И., Федоренко С.И.* Паратунская гидротермальная система на Камчатке. — В кн.: Вулканизм и глубины Земли. М.: Наука, 1971, с. 253–262.
- Пилипенко Г.Ф.* Гидрохимическая аномалия Узонского термального поля на Камчатке. — В кн.: Вулканизм и глубины Земли. М.: Наука, 1971, с. 229–238.
- Пилипенко Г.Ф.* Гидрохимическая характеристика Узонской термоаномалии. — В кн.: Вулканизм, гидротермальный процесс и рудообразование. М.: Недра, 1974, с. 83–110.
- Поляк Б.Г., Вакин Е.А., Овчинникова Е.Н.* Гидрогеологические условия вулканического района Камчатки (г. Петропавловск). М.: Наука, 1965, 94 с.

- Сидоров С.С.* Гидротермальная деятельность кальдеры Головинна (о. Кунашир). — Бюл. вулканол. станций, 1966, № 42, с. 22—29.
- Сугрбов В.М.* Характеристика пароводяных разведочных скважин. — В кн.: Паужетские горячие воды на Камчатке. М.: Наука, 1965а, с. 168—175.
- Сугрбов В.М.* Химический состав термальных вод вскрываемых скважинами. — В кн.: Паужетские горячие воды на Камчатке. М.: Наука, 1965б, с. 64—75.
- Fournier R.O., Rowe I.I.* Estimation of underground temperature from the silica content of water from hot springs and wet-steam wells. — Am. J. of Sci., 1966, vol. 264, p. 685—697.
- Fournier R.O., Truesdell A.H.* An empirical Na—K—Ca geothermometer for natural waters. — Geoch. et Cosmochim. Acta, 1973, vol. 37, N. 5, p. 1255—1275.
- Fournier R.O., Truesdell A.H.* Geochemical indicators of subsurface temperature, Part 2. Estimation of temperature and fraction of hot water mixed with cold water. — U.S. Geol. Survey J. of Res., 1974, vol. 2, N 3, p. 263—269.
- Fournier R.O., White D.E., Truesdell A.H.* Geochemical indicators of subsurface temperature, Part 1. Basic assumptions. — U.S. Geol. Survey J. of Res., 1974, vol. 2, N 3, p. 259—262.
- Kirsanov I.T.* Acid volcanism and thermal manifestations in the area of Mutnovsky and Gorely Volcanoes (Southern Kamchatka) — Napoli. Bull. Volcanologique, 1967, vol. XXX, p. 139—151.
- Orville P.M.* Alkali ion exchange between vapor and feldspar phases. — Am. J. of Sci., 1963, vol. 261, p. 201—237.
- Truesdell A.H., Fournier R.O.* Calculation of deep temperatures in geothermal system from the chemistry of boiling spring waters of mixed origin, Second United Nations Symposium on the development and use of geothermal resources, San Francisco, California, USA, 1975, vol 1, p. 837—844.

**В. П. Калугина, И. А. Клименко**

ВСЕГИНГЕО

## **ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД КАМЧАТКИ В КАЧЕСТВЕ ГИДРОМИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

Региональные исследования по изучению закономерностей формирования и распространения промышленных вод позволили установить, что максимальные концентрации редких и рассеянных элементов приурочены к хлоридным рассолам артезианских бассейнов платформ, краевых прогибов и межгорных впадин, углекислым водам альпийской складчатости и термальным водам регионов современного вулканизма. К числу последних относятся и гидротермы Камчатки, использование которых как комплексного полезного ископаемого позволит наряду с решением теплофикационных, геоэнергетических и бальнеологических задач осуществить извлечение полезных компонентов.

В процессе многолетних исследований института ВСЕГИНГЕО на территории Камчатского полуострова изучен состав многочисленных термальных источников и разработаны методические принципы гидрогеохимических методов поисков рудных месторождений. Установлено, что термальные воды Камчатки содержат повышенные концентрации редких щелочных металлов, бора и других элементов, которые могут представ