

УДК 551.23 (571.660)

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ГИДРОТЕРМЫ ЧУКОТКИ

Е.А. Вакин

Институт вулканической геологии и геохимии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006, e-mail: yakin@kcs.iks.ru

Введение

В восточной части Чукотского полуострова известно более 10 групп термоминеральных источников, в том числе и высокотемпературных – до 97°C. Чукотские гидротермы примечательны тем, что их разгрузка идет в условиях многолетней мерзлоты и тем, что в районе их выходов нет проявлений молодой вулканно-0магматической активности (рис. 1). Горячие источники Чукотки упомянуты еще в «скасах» казаков-землепроходцев и в материалах Северо-Восточной экспедиции 1785-1795 гг. [8]. В 30-х годах XX в. Экспедициями Главсевморпути обследованы гидротермы в юго-восточной части полуострова [2,6,8,10]. Многие источники описаны при проведении геолого-съемочных и тематических работ в середине пятидесятых годов [4,9 и др.] и в шестидесятые-семидесятые годы [3]. Были сделаны успешные

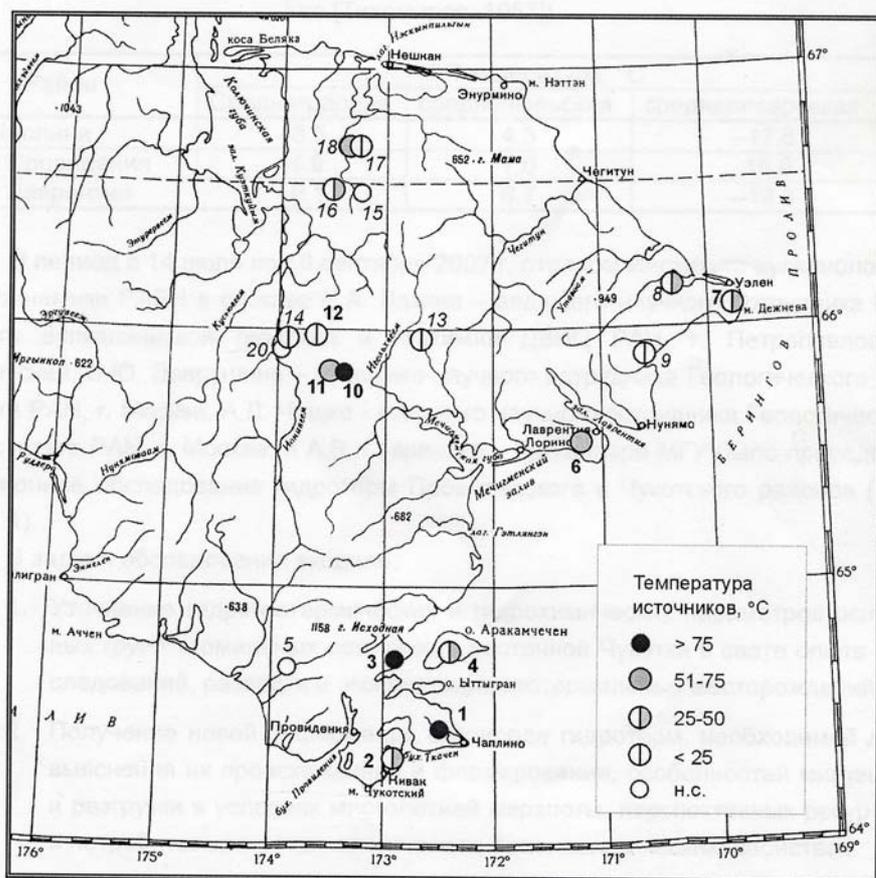


Рис. 1. Карта термоминеральных источников Восточной Чукотки: 1 – Чаплинские, 2 – Кивакские, 3 – Сенявинские, 4 – Аракамчеченские, 5 – Синеувэемские, 6 – Лоринские, 7 – Дежневские, 8 – Пыкеньвэемские, 9 – Итыкивэемские, 10 – Мечигменские, 11 – Туманные, 12 – Ионийские, 13 – Нельпыгеньвэемские, 14 – Олены, 15 – Кубинские, 16 – Тенинские, 17 – Тэюкейские, 18 – Нешканские. Подчеркнуты обследованные автором в 2002 г.

попытки хозяйственного освоения гидротерм: на Чаплинских и Лоринских источниках с середины пятидесятых годов функционировали пионерские лагеря с подсобными хозяйствами, на Кивакских – профилакторий. В конце 80-х годов изучение термальных источников Чукотки прекратилось, а существовавшие на них рекреационные предприятия пришли в состояние полного запустения.

Летом 2002 г. По инициативе Чукотского автономного округа (ЧАО) проведено ревизионное обследование гидротерм полуострова с целью выработать рекомендации по их дальнейшему изучению и освоению. Работы были организованы академиком РАЕН Г.С. Штейнбергом. В полевых исследованиях, кроме автора, участвовали сотрудники ГИН РАН В.Ю. Лаврушин и А.Л. Чешко и бакалавр МГУ А.В. Гавриков. Финансировались исследования администрацией ЧАО.

Проведенные исследования и полученные результаты

Полевые исследования проводились в период с 14 июля по 10 сентября и включали детальное (М 1 : 2500) гидрогеологическое картирование очагов разгрузки гидротерм, гидро-

геотермические исследования (сотни замеров) и газогидрохимическое опробование девяти наиболее крупных групп термальных источников. Анализ химического состава воды и состава спонтанных газов выполнен в Геологическом институте РАН. Определение изотопного состава воды (δD и $\delta^{18}O$) сделано в Институте геологии, минералогии, петрографии и геохимии рудных месторождений РАН.

Описание источников. Приводятся предельно сжатые характеристики четырех самых мощных групп высокотемпературных гидротерм (табл. 1,2,3 и рис. 1).

Чаплинские источники входят в число наиболее доступных для комплексного освоения. Ранее здесь функционировала база отдыха с развитой хозяйственной структурой. Источники разгружаются у правого борта широкой долины р. Ульхум в 5 км выше ее впадения в лиман (см. рис. 1). Долина заполнена рыхлыми отложениями мощностью более 60 м. Наиболее мощные (до 2 л/с) высокотемпературные (40-80°C) источники располагаются двумя группами у подножия высокой террасы. Ключевая площадка в виде термального болота в пойме с теплыми (20-35°) озерками и ручьями протягивается на 300 м. Чаплинские воды лечебные – это азотные, кремнистые, бромные, высокоминерализованные щелочные термы с высокими тепловыми и водными ресурсами.

Сенявинские источники расположены в долине р. Ключевой в 1.5 км от устья. Борта широтной долины, выработанной вдоль разломной зоны, сложены гранитами и гнейсами. Ключевая площадка протягивается по берегам реки на 500 м при ширине до 120 м. Источники выходят из открытых трещин в коренных породах, маломощных аллювиальных отложений, на склонах и на поверхности террас и в русле реки. Насчитывается более 150 источников. Дебиты отдельных выходов от 0.001 до 2.5 л/с, температура – от 20 до 79.7°C. Источников с температурой < 50° значительно больше, чем менее горячих, образующих периферию группы. Многие источники газируют. Воды лечебные – высокотермальные, кремнистые, радоновые – 1020 Бк/л (табл. 1,2,3).

Лоринские источники, благодаря сочетанию высоких ресурсов и качества воды с благоприятным экономико-географическим положением, освоены лучше остальных и остаются самым перспективным объектом разностороннего использования. Источники отличаются уникальной концентрацией разгрузки: все выходы гидротерм сосредоточены на площади менее 500 м². Источники в естественном виде не сохранились. Самый мощный выход вод каптирован капитальным бетонным колодцем размером 6 x 7 м. Зеркало воды поднято на 4 м над поймой, вода с температурой 58° «кипит» от пузырей газа и переливается через стенки, образуя мощный ручей, и лишь малая часть отбирается трубопроводом для хозяйственных нужд. Лоринские воды лечебные – кремнистые среднеминерализованные нейтральные, высокотемпературные слаборадиоактивные (Rn – 350 Бк/л) [4] (табл. 1,2,3).

Мечигменские источники не только самые мощные и горячие на Чукотке, но и выделяются живописностью термальных площадок и окружающих ландшафтов. Источники расположены в ненаселенной местности в долине правого притока р. Игельхвеем. Долина следует мощной разломной зоне, ее борта сложены порфирами, гранит-порфирами и их туфами. Ключевое поле протянулось на 850 м по обоим берегам реки. Плоское дно долины занято здесь термальными болотами и озерами и прогретыми площадками. Насчитывается более 100 отдельных выходов терм и большинство из них с температурой более 60°. Самые горячие (до 97°) имеют вид воронок – грифонов, окруженных карбонатно-кремнистыми отложениями похожими на гейзерит. Многие из них газируют. По гидрохимическому типу Мечигменские источники отличаются от остальных вод Чукотки – это азотно-углекислые термы. Этот тип вод более характерен для районов молодого вулканизма. Таким гидротермам свойственны высокие температуры и большие тепловые ресурсы.

Суммарный расход термоминеральных вод и вынос тепла. Детальные исследования очагов разгрузки позволили составить представление о размерах и конфигурации восходящих потоков гидротерм. Их мощность (вынос тепла) рассчитывается как произведение теплосодержания (для воды численно равное температуре) на дебит. При выходе на поверхность термоминеральные воды часто не образуют выраженных источников, а разгружаются в руслах рек, в термальных болотах или, скрыто, в аллювиальные отложения, формируя вторичные грунтовые потоки. Поэтому, для оценки величины суммарной разгрузки гидротерм применен гидрохимический метод, который сводится к определению доли термоминеральной воды в водотоке, дренирующем очаг разгрузки, по приращению концентрации компонента-индикатора. В качестве индикатора был выбран Cl^- , который является доминирующим анионом в составе гидротерм Чукотки и практически отсутствует в поверхностных и грунтовых водах района. Точность таких оценок – $\pm 20\%$. Тепловые параметры гидротерм приведены в таблице 1.

Таблица 1. Тепловые характеристики гидротерм

Источники	Т°С max	Σ дебит, л/с	Вынос тепла		Т°С базовая
			Ккал/с	Мвт	
Чаплинские	90	40	3600	15	120-160
Сенявинские	80	55	4400	18	110-160
Лоринские	60	65	3900	16	120-170
Мечигменские	97	60	5800	24	140-220
Туманные	59	7	410	1.7	150-200
Кивакские	43	10	430	1.8	80-120
Дежневские	69	5	350	1.4	80-160

Примечание. Т базовая – вероятный интервал глубинных температур формирования гидротерм по SiO_2 , Na-K, Na-K-Ca геотермометрам [11].

Газогидрохимические и изотопные исследования. Для отбора образцов вод и газов в каждой группе гидротерм выбраны наиболее представительные водопрооявления – источники с максимальными температурами дебитами и минерализацией (последняя определялась по электропроводности). На месте определялись также такие неустойчивые показатели как pH, Eh, HCO₃. Данные о солевом составе гидротерм сведены в таблице 2.

Изотопный состав природных вод Восточной Чукотки ранее не изучался. Результаты наших исследований показаны на диаграмме δD - $\delta^{18}O$ (рис. 2) и в табл. 2.

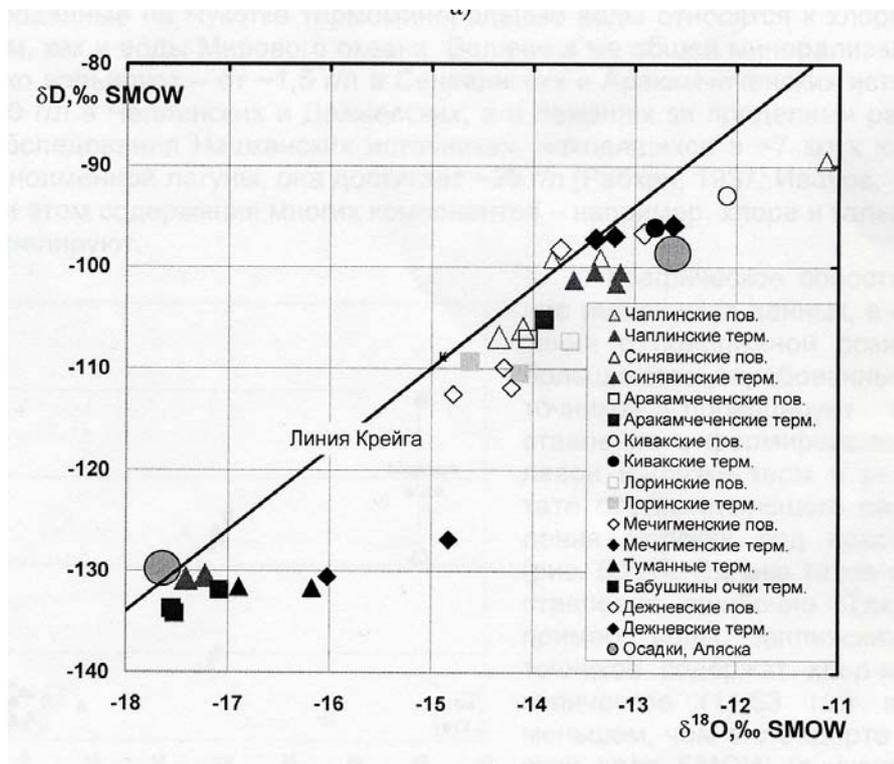


Рис. 2. Изотопный состав термоминеральных и поверхностных вод (по А.Л. Чешко). Залитый знак – термальные, пустой – поверхностные воды. 1 – Чаплинские, 2 – Снявинские, 3 – Аракамчеченские, 4 – Кивакские, 5 – Лоринские, 6 – Мечигменские, 7 – Туманные, 8 – Ионийские, 9 – Дежневские.

Таблица 2. Химический состав термальных и минеральных вод, (мг/л)

Источники	Т°С	pH	катионы						анионы				SiO ₂	M, г/л	Гидроизотопы	
			Na	K	Ca	Mg	Li	Cl	SO ₄	HCO ₃	F	δ ¹⁸ O‰			δD‰	
			Азотные Cl/Na-Ca термы													
Чаплинские	87.5	8.61	4800	108	2505	60.0	2.68	11630	225.0	122	3.1	76.8	19.6	-13.6	-99	
Сенявинские	78.7	8.59	375	12	88	2.4	0.50	717	62.5	29	6.4	59.2	1.3	-17.4	-131	
Аракамченские	37.4	8.36	400	9	72	4.8	0.41	730	84.7	34	2.7	31.4	1.3	-13.9	-105	
Кивакские	43.1	8.15	875	19	721	2.0	0.80	2610	63.3	22	2.7	32.1	4.3	-12.8	-96	
Дежневские	60.1	7.83	5000	200	1683	2.0	14.4	11350	92.1	24	2.6	22.6	18.3	-12.6	-96	
Лоринские	60.0	6.98	1330	83	321	2.0	3.56	2590	82.2	81	3.0	82.6	4.5	-14.1	-110	
Углекисло-азотные Cl/Na-Ca термы																
Мечигменские	89.7	7.05	1240	77	104	12.0	5.01	2050	79.7	190	5.0	69.2	3.8	-16	-131	
Туманные	55.1	-	1000	69	108	12.0	4.34	1710	71.5	207	4.2	53.6	3.2	-16.9	-132	
Углекислые Cl-HCO ₃ /Na-Ca-Mg термы																
Ионийские	20.1	6.45	1790	167	930	182.0	4.24	3860	340.0	1928	2.4	115	9.2	-17.5	-134	
Реки																
Выше Сенявинских ист.	-	-	2	0	4	7.0	-	11	3.0	24	0.5	-	0.1	-14.1	-106	
Ниже Сенявинских ист.	-	-	4	1	8	7.0	-	35	8.0	24	0.5	-	0.1	-14.3	-107	

Обсуждение

Для выработки прогнозов и рекомендаций по утилизации гидротерм необходимо построить гипотезу их формирования. Надо ответить как минимум на три вопроса: происхож-

дение собственно воды (H_2O), растворенных в ней веществ (солей и газов) и теплового питания гидротермальных систем.

Происхождение воды. На диаграмме изотопного состава природных вод восточной Чукотки (рис. 2) все фигуративные точки располагаются практически на так называемой «линии метеорных вод» (прямой Крейга). Изотопный состав вод, даже расположенных в непосредственной близости от моря – Чаплинских, Аракамчеченских, Кивакских и Дежневских источников, близок к составу местных поверхностных вод и резко отличается от состава морской воды. В то же время, многолетняя мерзлота (ее мощность достигает 200 м) является абсолютным водоупором и ограничивает возможности питания гидротерм инфильтрационными водами. Вода Сенявинских, Мечигменских, Туманных и Ионийских источников изотопно легче не только вод «Чаплинско-Дежневской» группы, но и местных речных вод. Видимо, существует другой, изотопно более легкий источник водного питания этих гидротерм. Это могут быть подмерзлотные воды, обогащенные δD - $\delta^{18}O$ в процессе фракционирования при образовании льда [1] или воды тающего под влиянием гидротерм многолетнего льда, изотопный состав которого формировался в более холодные климатические эпохи и характеризуется низкими величинами δD и $\delta^{18}O$. В Мечигменской депрессии заметно еще и утяжеление термальных вод по кислороду – «кислородный сдвиг», который увеличивается с длительностью подземной циркуляции вод и с уменьшением отношения вода-порода.

Химический состав. По генетической классификации, основанной на составе сопутствующих газов [5] на Чукотке можно выделить три гидрохимических типа терм: 1) *азотные* – в их газовом составе доминирует N_2 – 93-98% об, который, судя по N_2/Ar отношению, имеет атмосферное происхождение; 2) *азотно-углекислые* – единственный представитель Мечигменской термы, содержащие в составе свободных газов до 57.6% CO_2 ; 3) *углекислые* – до 92.6% CO_2 содержится в газах низкотемпературных Ионийских и еще несколько холодных углекислых источниках. Углекислота имеет, видимо, термометаморфическое происхождение. В газах гидротерм всех типов очень велика концентрация гелия – на 3-4 порядка выше атмосферной. Его изотопный состав несколько отличается от типичного радиогенного. Данные о газовом составе приведены в таблице 3.

По солевому составу все термальные воды Чукотки относятся к хлоридным кальциево-натриевым (табл. 2). По величине минерализации гидротермы контрастно разделяются на две группы: высоко минерализованные – 18-20 г/л (Чаплинские и Дежневские) и мало минерализованные – 1.3-4.5 г/л (все остальные). Воды с высокой минерализацией разгружаются в устьевых частях речных долин, заполненных мощными рахлыми отложениями вблизи прибрежных лагун. Они радикально отличаются от морских вод: в них значительно ниже относительное содержание SO_4 и Mg и во много раз выше – Ca. Нам представляется правильным

предположение В.В. Иванова о том, что минерализация этих вод сформировалась за счет вымывания солей из иловых отложений древних морских бассейнов [4].

Таблица 3. Состав свободных газов термоминеральных источников Чукотки, (% об.)

Источники	T°С	CO ₂	N ₂	O ₂	Ar	CH ₄	He	(³ He/ ⁴ He) 10 ⁸
Чаплинские	88	0.07	94.1	0.10	1.50	1.20	0.296	30.5
Сенявинские	79	0.05	98.0	0.13	1.70	0.13	0.110	26.7
Аракамчеченские	37	0.02	95.9	3.02	1.30	0.00	0.043	44.4
Кивакские	43	0.07	96.8	2.42	1.30	0.00	0.106	20.2
Дежневские	60	0.06	94.6	0.01	1.40	1.04	0.305	42.0
Лоринские	60	1.04	96.4	0.57	0.94	0.78	0.199	51.1
Мечегменские	90	57.60	40.1	0.85	0.88	0.84	0.430	53.8
Туманные	55	4.90	93.6	1.00	1.20	0.00	0.433	55.5
Ионийские	20	92.60	3.4	0.13	0.02	0.00	0.023	65.5

Термы с малой минерализацией разгружаются непосредственно в трещинных зонах интрузивных пород и на их контактах с метаморфическими отложениями (Сенявинские и Аракамчеченские источники), либо сквозь маломощный слой аллювия (Мечигменские и Лоринские источники). Последний тип минерализации обычен для термальных трещинных вод кристаллических массивов и в других регионах. Низкотемпературные углекислые средне минерализованные воды Ионийских источников относятся к типу гидрокарбонатно-хлоридных кальциево-натриевых.

Чукотские термальные воды являются лечебными – они содержат высокие концентрации SiO₂ (до 83 мг/л) и ряда микрокомпонентов (в данной работе не обсуждается).

Тепловое питание. Гидротермы Чукотки характеризуются не только высокими температурами, но и большим концентрированным выносом тепла (табл. 1). Температуры гидротерм на поверхности всегда ниже глубинных, в зоне их формирования. Прямых измерений глубинных температур на Восточной Чукотке не было. Ориентировочно их можно оценить, используя гидрохимические геотермометры – эмпирические и расчетные соотношения, связывающие температуру и концентрацию или равновесные отношения концентраций растворенных компонентов – SiO₂, Na/Li, Na/K, Na-K-Ca и т.д. [11]. Геотермометры не дают возможности определить положение водного резервуара с данной температурой в пространстве (геологическом разрезе) и времени (температуры могут быть реликтовыми). Прямые измерения теплового потока (q) и температурного градиента (Г) на востоке Чукотки также не проводились. По расчетным данным [7] q здесь составляет 60-65 Мвт/м², Г – 25-30°С/км, изотерма + 100° лежит на глубине ~ 3 км, а геотермальные резервуары с температурами, соот-

ветствующими показаниям геотермометров, при отсутствии локальных источников тепла располагались бы на глубинах ~ 5 км. Механизм глубинного теплового питания гидротерм остается дискуссионным.

Заключение

По меньшей мере пять групп гидротерм (Чаплинские, Сенявинские, Лоринские, Мечигменские и Дежневские) характеризуются высокими температурами и дебитами. Восходящие потоки гидротерм, помимо большой тепловой мощности, отличаются и концентрированностью очагов разгрузки: на их периферии практически отсутствуют зоны источников с низкими температурами. Величина естественной тепловой и водной разгрузки этих групп источников достаточна для создания на них одновременно лечебных и рекреационных учреждений, тепличных хозяйств или небольших (1-2 Мвт) ГеоЭС бинарного цикла.

В то же время, у автора есть серьезные сомнения в возможности существенно нарастить искусственным путем добычу термальных вод, как это делается в других регионах. По всем данным современные морские воды не участвуют в формировании гидротерм. Возникает вопрос о путях водного питания гидротермальных систем при наличии мощной многолетней мерзлоты. Облегченный гидроизотопный состав терм наводит на мысль об их локальном «самоснабжении» за счет выплавления воды из многолетней мерзлоты восходящими гидротермальными потоками. В этом случае, при стабильной работе конвективной ячейки, базисная температура гидротермальной системы, в конечном итоге, должна отличаться от температуры разгрузки на величину скрытой теплоты плавления льда (80 ккал/кг) т.е. на ~ 80°. Из таблицы 1 видно, что средние температуры по геотермометрам отличаются от поверхностных приблизительно на такие величины. Из этого следует, что водная масса нисходящих холодных и восходящих горячих потоков взаимосвязана и достаточно жестко сбалансирована. Попытки дополнительно изъять термальную воду из восходящего потока приведут к деградации гидротермальной системы не из-за дефицита тепла, а из-за сокращения водного питания за счет уменьшения плавления льда многолетней мерзлоты.

Автор искренне благодарит главу Проведенского района В.Е. Данилюка, главу Чукотского района М.А. Зеленского и офицеров пограничного отряда за неоценимую помощь в организации полевых работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ветштейн В.Е. Изотопы кислорода и водорода в природных водах СССР. Л.: Недра, 1982. 216 с.
2. Головачев Ф.А. Минеральные источники юго-восточной оконечности Чукотского полуострова // Арктика. 1937. № 5. С. 57-80.

3. Завгородний В.Ф. О типизации и условиях формирования термоминеральных вод Восточной Чукотки // Колыма. 1962. № 3. С. 17-20.
4. Иванов В.В. Основные закономерности распространения и формирования термальных вод Дальнего Востока СССР // Вопросы формирования и распространения минеральных вод СССР. М.: ЦНИИКиФ Минздрав СССР, 1960. С. 171-262.
5. Иванов В.В., Невраев Г.А. Классификация подземных минеральных вод. М.: Недра, 1964. 166 с.
6. Никольский А.П. Горячие ключи залива Лаврентия и Мечигменской губы // Арктика. 1937. № 5. С. 81-92.
7. Поляк Б.Г. Тепломассопоток из мантии в главных структурах земной коры. М.: Наука, 1988. 192 с.
8. Пономарев В.М. Горячие источники Чукотского полуострова // Советская Арктика. 1936. № 12. С. 98-100.
9. Стремяков А.Я. Гидрогеотермические условия Чукотского полуострова и перспективы использования его гидротермальных ресурсов // Региональная геотермия и распространение термальных вод в СССР (Труды 2-го совещания по геотермическим исследованиям в СССР). М.: Наука, 1967. С. 280-283.
10. Швецов П.В. Некоторые данные к характеристике горячих минеральных источников Чукотки // Вопросы курортологии. 1937. № 5. С. 90-283.
11. Fournier R.O. Application of water geochemistry // Geothermal systems: Principles and case histories. L.: Willey, 1981. P. 109-143.