

МИНЕРАЛЬНЫЕ ВОДЫ АВАЧИНСКОЙ ДЕПРЕССИИ, КАМЧАТКА

© 2021 Таран Ю.А.^{1,2}, Рябинин Г.В.³, Покровский Б.Г.⁴, Нажалова И.Н.⁵, Малик Н.А.¹¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006;
e-mail: yuri.taran@gmail.com²Institute of Geophysics, UNAM, Coyoacan 04510, Mexico City, Mexico³Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006⁴Геологический институт РАН, Москва, Россия, 119017⁵АО «Заречное», пос. Раздольный, Камчатский край, Россия, 684020

Скважинами глубиной до 3000 м у подножья действующих вулканов Корякский и Авачинский в пределах Авачинской депрессии вскрыты минерализованные воды (до 22 г/л общей минерализации) с температурой около 60°C в западной части разведанной области и холодные — восточнее, ближе к Тихоокеанскому побережью. В статье приведены литературные, фондовые и собственные данные по химическому и изотопному составу этих вод. Состав вод хлоридно-натриевый, с очень низкими содержаниями сульфата и магния и с высоким — кальция, и необычно высокой концентрацией стронция. Содержание свободного газа примерно 50 мл/л. В газе преобладают метан и азот (примерно 70 и 30 об.%, соответственно), присутствует сероводород (около 30 мг/л) и очень мало CO₂ (< 0.5 об.%). Отношение N₂/Ar, как правило, выше воздушного, т. е. присутствует неатмосферный азот. Обсуждаются возможные варианты взаимодействия вода-порода, ответственные за химический состав вод, и предлагается концептуальная модель предполагаемого бассейна минеральных вод, включающая положение возможных источников тепла и минерализованных растворов.

Ключевые слова: Камчатка, Авачинская депрессия, термоминеральные воды, изотопная геохимия.

ВВЕДЕНИЕ

Камчатский полуостров отличается большим количеством гидротермальных систем и многообразием типов термальных и минеральных вод (Трухин, 2003; Таран, 2009 и ссылки в этих работах). Большинство систем ассоциировано с отдельными вулканами или вулканическими центрами, а также с вулcano-тектоническими структурами. Различают высокотемпературные «кипящие» гидротермальные системы с кипящими источниками и паровыми струями на поверхности, где бурением вскрыты воды с температурами выше 300°C, а также гидротермальные системы с температурами на доступных бурению глубинах ниже 100°C. Примерами таких систем могут быть Мутновская и Паратунская, ближайшие к столице Камчатского края г. Петропавловску-Камчатскому (Таран, Пилипенко, 1984; Трухин, Шувалов, 1979). Термальные воды этих систем, как правило, имеют невысокую минерализацию, до 3 г/л, характеризуются

углекисло-азотным, до азотного, составом газа и хлоридно-сульфатным, сульфатно-хлоридным анионным составом. Термальные высоко-минерализованные воды (до 15 г/л) со свободным газом метанового состава и с сероводородом встречаются только на юге Западной Камчатки, где магматические тела Восточного вулканического пояса Камчатки внедряются в осадочные нефте-газоносные породы: это Саванские и Голыгинские источники и Кошелевская гидротермальная система (Бескровный, Лобков, 1977; Писарева, 1987; Трухин, 2003; Таран, 2009). На востоке Камчатки воды Ca-Na-Cl состава с минерализацией до 30 г/л были вскрыты скважинами на Богачевской площади, на нынешней территории Кроноцкого заповедника, пробуренными в 1940-годы в поисках нефти (Кудрявцева, 1973).

В начале 1970-х гг. у подножья вулкана Корякский, вблизи экструзивного образования «высота 202.0» в верховьях р. Пиначева, рядом с теплыми (11°C) источниками, была пробурена скважина ГК-1П, которая вывела на поверхность

газирующую минерализованную воду (около 10 г/л) с газом преимущественно метанового состава¹. В конце 1980-х гг. недалеко от скважины ГК-1П проводились поиск и разведка термальных вод, инициированных по причине существования здесь обширных площадей незамерзающих водотоков и озер, указывающих на скрытую разгрузку термальных вод². Пробуренные в этом районе, недалеко от пос. Кеткино, скважины (рис. 1, 2) вывели на поверхность высокоминерализованную воду (до 22 г/л) с температурой до 60°C, в свободном газе которой преобладает метан и присутствует сероводород. Кеткинское месторождение термальных вод используется в

настоящее время в бальнеологических целях. Примерно в это же время было пробурено несколько глубоких скважин к востоку от Кеткинской площади (Радыгинская площадь), а также в самом г. Петропавловске-Камчатском (рис. 2, табл. 1). Эти скважины также вскрыли минерализованные воды со свободным газом преимущественно метанового состава, но холодные. Первые опубликованные данные о составе воды и газа этих скважин можно найти в работе (Кириухин и др., 2015). В работе (Копылова и др., 2018) приводятся детальные гидрохимические данные для нескольких из этих скважин, включенных в режимные наблюдения для поисков предвестников землетрясений. Данные опробования скважин в 1980–1990 гг., включающие химический состав воды и газа, приведены в производственных отчетах Паратунской гидрогеологической экспедиции¹⁻⁵. В этих отчетах содержатся подробные описания литологии разрезов по результатам изучения кернов скважин.

Цель предлагаемой работы — собрать воедино все имеющиеся данные по геохимии высокоминерализованных вод района, охарактеризовать эти воды в терминах количественных методов современной геохимии и попытаться выяснить особенности их формирования.

¹ Овчеренко В.В. Наумов Л.Т., Ворожейкина Л.А. Отчет о результатах поисковых работ на термальные воды, проведенных в юго-западной части района Корякско-Авачинской группы вулканов (участок высоты 202) в 1970-1971 гг. Камчатский филиал ФБУ «ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу». № 328. П. Термальный, 1971. 126 с.

² Евтухов А.Д. Чебыкин И.Н., Петракова Т.П. Отчет о детальных поисках термальных вод на Кеткинском участке Пиначевской геотермальной площади в 1986-1994 гг. Камчатский филиал ФБУ «ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу». № 5780. П. Термальный, 1994. 534 с.



Рис. 1. Отбор проб на скважине К-23 в 1986 г. На снимке гидрогеологи Паратунской гидрогеологической экспедиции С.В. Спектор (слева) и Ю.Ф. Манухин (справа). Пробы отбирает Ю.А. Таран.

Fig. 1. Sampling of well # K-23 in 1986. The photo shows the hydrogeologists of the Paratunskaya Hydrogeological Expedition S.V. Spector (left) and Yu.F. Manukhin (right). Samples are taken by Yu.A. Taran.

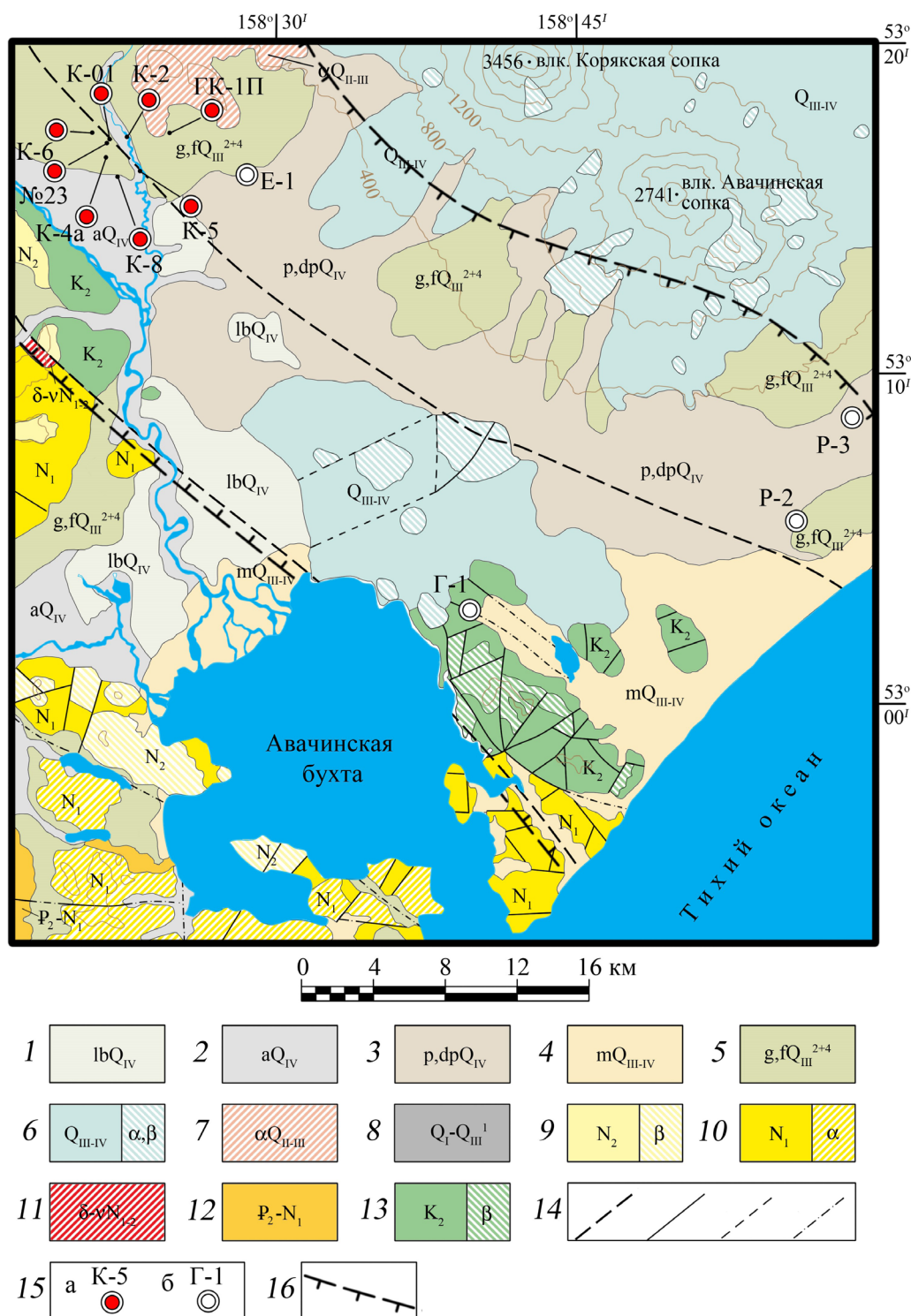


Рис. 2. Схематическая гидрогеологическая карта района (составлена по материалам отчета¹): 1 — слабо-водоносный голоценовый озерно-болотный горизонт. 2 — водоносный голоценовый аллювиальный горизонт. 3 — водоносный голоценовый пролювиальный и делювиально-пролювиальный комплекс. 4 — водоносный верхнеплейстоцен-голоценовый морской и аллювиально-морской горизонт. 5 — водопроницаемый локально-водоносный верхнеплейстоценовый ледниковый и водно-ледниковый комплекс. 6 — водоносный верхнеплейстоцен-голоценовый вулканогенный комплекс. 7 — водоносные зоны трещиноватости средне-верхнеплейстоценовых субвулканических интрузий. 8 — водоносный плейстоценовый комплекс нерасчлененных рыхлых отложений*. 9 — водоносный плиоценовый вулканогенный комплекс. 10 — водоносный миоценовый вулканогенный и вулканогенно-терригенный комплекс. 11 — водоносные зоны трещиноватости миоценовых и плиоценовых интрузивных образований. 12 — водоносный эоцен-миоценовый туфогенно-осадочный комплекс. 13 — водоносные зоны трещиноватости верхнемеловых метаморфизованных образований. 14 — различные типы тектонических нарушений (разломы); 15 — скважина и ее номер:

a — скважины Кеткинского месторождения термоминеральных вод и скважина ГК-1П (Пиначевская); *b* — другие скважины. 16 — Условные границы Авачинской депрессии (Поздеев, 2003).

* показаны на стратиграфических колонках скважин, рис. 3.

Fig.2. Schematic hydrogeological map. map (according to report by Serezhnikov et al.¹): 1 — low-saturated aquifer of Holocene marsh- and lacustrine-march deposits; 2 — Holocene alluvial aquifer; 3 — Holocene aquifer of alluvial deposits; 4 — Pleistocene-Holocene marine and delta deposits; 5 — Upper Pleistocene glacial deposits; 6 — saturated aquifer of the Upper Pleistocene glacial deposits; 7 — Upper Pleistocene-Holocene fractured volcanogenic deposits; 8 — aquifer of the loose undifferentiated deposits*; 9 — saturated zones of the Pliocene volcanics; 10 — Middle Miocene volcanogenic and terrigenous formation; 11 — fractured zones of Miocene-Pliocene intrusives; 12 — Eocene-Miocene aquifer of sedimentary tuffs; 13 — Upper Cretaceous fractured metamorphic aquifers; 14 — faults; 15 — well and its number: (a) Ketkino and Pinachevo, (b) other wells; 16 — conditional boundaries of the Avachinsky depression (Pozdeyev, 2003).

* Shown in Fig. 3 on well sections.

ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНЫЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЙОНА

Гидрогеологическая карта, основой для которой служит геологическая съемка 1980–1990 гг. (Шеймович, 2000) и материалы отчета³, представлена на рис. 2. На карте также показаны положения опробованных скважин, координаты которых и некоторые параметры приведены в табл. 1. Существует несколько моделей глубинного строения Авачинской депрессии, основанных на данных геологических съемок (Шеймович, 2000) и инструментальных геофизических измерений (Мороз, Гонтовая, 2003; Попруженко, Апрельков, 1987). Общим является

представление об Авачинской депрессии как о грабенообразной структуре, простирающейся от Тихоокеанского побережья в северо-западном направлении (рис. 2) на расстояние около 75 км (Поздеев, 2003). Палеотектонические реконструкции демонстрируют весьма сложные взаимоотношения разновозрастных комплексов пород на востоке Камчатки (Константиновская, 2003; Шапиро, 1987), однако в случае Авачинской депрессии разрезы по поисковым и разведочным скважинам (рис. 3, табл. 1) позволяют вполне определенно судить о ее строении до глубин 2000–3000 м. По результатам бурения скважин основание депрессии представлено сильно дислоцированными метаморфизованными вулканогенно-осадочными породами никольской толщи верхнемелового возраста. Собственно депрессия сложена относительно слабо дислоцированными вулканогенно-осадочными отложениями, возраст которых варьирует от среднего эоцена — олигоцена до миоцена — плиоцена, перекрытыми рыхлыми четвертичными вулканогенными осадками (Поздеев, 2003). Гидрогеологические

³ СЕРЕЖНИКОВ А.И. ЛАЗАРЕВ В.А., ПОЛЕТАЕВА А.А.

Отчет о результатах гидрогеологического доизучения с инженерно-геологическими и геоэкологическими исследованиями и картографированием масштаба 1:200 000, проведенного на территории листа N-57-XXVII в 1991–1996 г. Камчатский филиал ФБУ «ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу». № 6045. Елизово, 2000. 1304 с.

Таблица 1. Сведения о скважинах Авачинской депрессии.

Table 1. Information about the wells of the Avachinsky Depression.

№ скв.	Координаты		Год бурения	Глубина скв., м	Температура на глубине, °С/м	Макс. температура на устье, °С
	северная широта	восточная долгота				
К-01 ²	53°16'55"	158°21'34"	1991	2322	76.7/1688	69.5
К-23 ²	53°16'48"	158°21'28"	1986	341	58.8/340	58.2
К-2 ²	53°17'00"	158°22'28"	1987	1295	67.3/1196	49.0
К-4а ²	53°16'21"	158°21'24"	1988	1641	85.1/1620	73.0
К-5 ²	53°16'01"	158°23'14"	1988	1506	66.1/1430	49.3
К-6 ²	53°17'08"	158°20'42"	1990	1513	60.3/1512	55.5
К-8 ²	53°15'56"	158°22'13"	1989	1529	76.4/1515	66.0
ГК-1П ⁴	53°17'07"	158°24'34"	1969	1261	53.5/1230	28.7
Е-1 ¹	53°15'50"	158°28'37"	1984	3003	74.6/3000	6.8
Г-1 ⁵	53°02'47"	158°39'47"	1987	2542	60.0/2542	10.5
Р-3 ³	53°08'39"	158°59'02"	1992	1503	33.0/1500	17.8
Р-2 ³	53°05'27"	158°56'03"	1993	1504	29.8/1443	7.5

Примечание. Информация по скважинам заимствована из отчетов^{1–5}.

Notes: Information on the wells is taken from the reports^{1–5}.

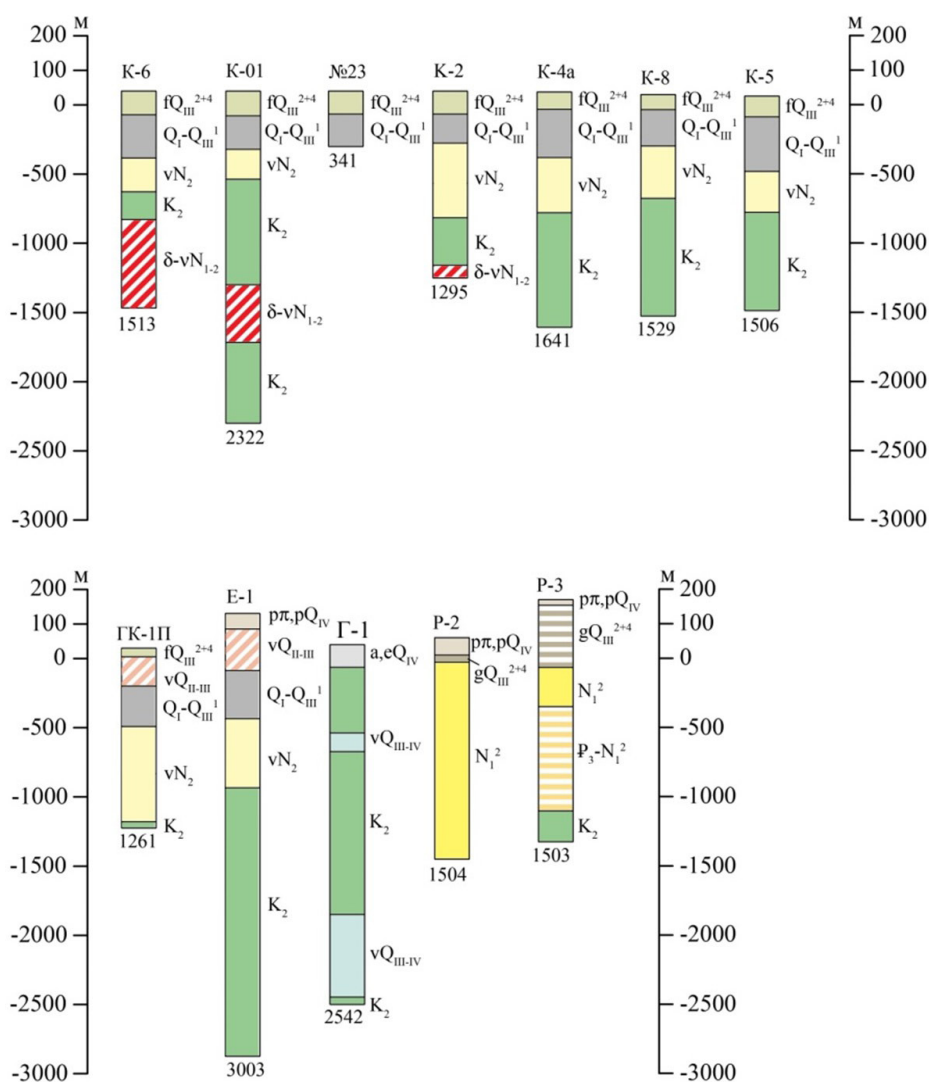


Рис. 3. Стратиграфические колонки скважин. Условные обозначения см. на рис. 2.

Fig. 3. Stratigraphic sections of wells. See legend in Fig. 2.

условия рассматриваемого района обобщены в отчете⁴ и работе (Манухин, Павлова, 2011). С точки зрения гидрогеологии по глубине здесь выделяются два основных комплекса. Верхняя часть разреза объединяет четвертичные рыхлые и вулканогенные отложения в единый водоносный комплекс^{2,3}. Это зона интенсивного водообмена, которую можно рассматривать, как элемент артезианского бассейна с зонами водного питания на склонах ближайших вулканов и вулканических хребтов (рис. 2, 3). Скопления подземных вод в верхнемеловых метаморфизованных осадочных породах, слагающих фундамент Авачинской депрессии, приурочены к зонам тектонической

или пластовой трещиноватости. Минеральные подземные воды, циркулирующие в основном по зонам тектонической трещиноватости, имеют повышенную минерализацию (до 15 г/л) и хлоридно-натриево-кальциевый состав. В газовом составе минеральных подземных вод верхнемеловых метаморфизованных вулканогенно-осадочных образований преобладает метан. Минеральные подземные воды в верхнемеловых образованиях, в границах Авачинской депрессии, вскрываются практически всеми глубокими скважинами. Однако самые высокие температуры подземных вод фиксируются на локальном участке депрессии, в районе Кеткинского месторождения термоминеральных вод.

Расходы скважин Кеткинского месторождения невелики. Скважина Е-1 и скважины Радыгинской площади Р-2 и Р-3 не изливаются. «Городская» скважина Г-1 имеет исчезающе малый расход в несколько миллилитров в секунду⁴ (Копылова и др., 2018). Наиболее

⁴ Забарный Г.Н. Мальцев В.В., Шулюпин А.Н. Отчет о результатах бурения на термальные воды поисковой скважины Г-1 на участке «Хлебозавод» Петропавловской площади в 1986-1988 гг. Камчатский филиал ФБУ «ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу». № 5243. Петропавловск-Камчатски, 1988. 166 с.

глубокая Кеткинская скважина K01 (2322 м) имеет расход до 6 л/с, и только она используется для пополнения бассейнов и ванн бальнеологического курорта (данные 2020 г).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе измерения физико-химических параметров вод опробованных скважин (рН и температура, °С) проводились непосредственно в точках отбора проб с помощью полевых рН-метра и цифрового термометра. Отбор свободных газов проводился с помощью пластмассовой воронки, шприца и трехходового крана в стеклянные бутылки объемом 200 мл методом вытеснения. Газовые анализы выполнялись в Камчатском филиале Единой геофизической службы РАН методом газовой хроматографии (аналитик И.В. Лукашевская). Определение концентраций основных катионов и анионов (Na, K, Ca, Mg, F, Cl, SO₄) в водных пробах также выполнялось в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН методом ионной хроматографии (METRНОМ-801, аналитик Е.В. Волошина), атомной абсорбции (Sr) и мокрой химии (NH₄, HCO₃, H₂S) (аналитики С.М. Иванова, Е.А. Якимова). Анализ на микроэлементы проводился в Геологическом институте РАН методом индукционно связанной плазмы с масс-спектроскопической регистрацией (ICP-MS) (аналитик О.И. Окина). Пробы на изотопный состав серы готовились в лаборатории осаждением CdS из 1 л водной пробы 10% раствором ацетата кадмия. Изотопные составы воды ($\delta^{18}\text{O}$ и δD), серы растворенного сероводорода ($\delta^{34}\text{S-H}_2\text{S}$) и сульфата ($\delta^{34}\text{S-SO}_4$), а также углерода CO₂ в свободном газе ($\delta^{13}\text{C-CO}_2$) были проанализированы в Геологическом Институте РАН, используя хромато-масс-спектрометрический комбинированный метод на аппаратуре Finnigan Delta Plus XP continuous-flow IRMS. Изотопный состав воды дан в промилле относительно стандарта V-SMOW (средняя океаническая вода). Изотопный состав углерода в промилле относительно V-PDB (белемнит меловых отложений), а изотопный состав серы — в промилле относительно V-CDT (троилит каньона Дьябло).

Изотопный состав гелия и отношения He/Ne измерялись в Институте геохимии РАН им. Вернадского по методикам, приведенным в работах (Рожков, Верховский, 1991)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Химический и изотопный состав воды. В пределах Кеткинско-Пиначевской площади (рис. 2, табл. 1) пробурено 15 скважин до глубин превышающих 2000 м (скважина K-01, 2322 м).

Три параметрические глубокие скважин пробурены также к востоку от этой площади (рис. 2, скважины Г-1, Р-2 и Р-3). Эти скважины также вскрыли минерализованные воды с преобладанием метана в свободном газе, но температуры вод оказались низкими (табл. 1). Скважина Е-1 была пробурена в 1984 г. до 3003 м, затем, на глубине 647 м была установлена цементная пробка, и в скважину стала поступать вода только из верхнего горизонта². В период разведки Кеткинской площади были отобраны и проанализированы больше сотни проб воды и газа. Таблицы анализов составили значительную часть отчета². В табл. 2 приведены данные авторов и доступные в литературе составы проб воды из скважин, отобранных в регионе в последнее время. По данным из отчета Евтухова и др.² показаны средние составы для скважин с самоизливом. Кроме того, добавлены анализы воды из скважин ГК-1П и Г1 из работ (Кирюхин и др., 2015; Копылова и др., 2018). В табл. 3 приведены данные по составу микроэлементов в воде некоторых скважин. Для скважин ГК-1П и Г-1 данные по микроэлементам взяты из работы (Копылова и др., 2018). Изотопные составы воды анализировались в нашей работе только для четырех проб из Кеткинских скважин, скважины ГК-1П и скважины Р-3. Для нескольких скважин Кеткинской площади данные взяты из работы (Кирюхин и др. 2015). Изотопный состав метеорных вод добавлен из работы (Чешко, 1994).

Скважины Кеткинской площади, включая скважину ГК-1П, скважину Г-1, расположенную примерно в 30 км юго-восточнее, в пределах Петропавловска-Камчатского, а также скважины Р-2 и Р-3⁵, пробуренные еще в 10-15 км восточнее (рис. 2), выводят на поверхность воды, близкие по составу. Это высокоминерализованные воды (8–15 г/л) хлоридно-натриевого типа с повышенным содержанием кальция (табл. 2). Различаются эти воды температурой на изливе и соотношениями некоторых второстепенных компонентов. Только скважины Кеткинской площади выводят на поверхность термальные воды (до 60°С). В этих же водах определены очень низкие концентрации сульфата и магния (ниже 10 мг/л и 2 мг/л, соответственно) и очень высокие — до 67 мг/л — стронция (табл. 2). Таким образом, речь может идти о региональном бассейне минеральных вод глубокого формирования с локальным прогревом в районе Кеткинской площади.

Изотопный состав метеорных вод района зависит от высоты над уровнем моря зон водного

⁵ Евтухов А.Д., Чебыкин И.Н., Патракова Т.П. Отчет о проведении общих поисков термальных вод на Радыгинской площади в 1991-1995 г.г. Камчатский филиал ФБУ «ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу». № 5837. П. Термальный, 1995. 107 с.

Таблица 2. Химический (мг/л) состав воды и изотопный состав воды (δD , $\delta^{18}O$) и серы ($\delta^{34}S$) растворенного H_2S и растворенного SO_4 . Пустые клетки в этой и последующих таблицах означают, что компонент или не определялся, или его концентрация ниже предела обнаружения.

Table 2. Chemical (mg/l) and isotopic composition of water (δD , $\delta^{18}O$) and sulfur of dissolved H_2S and SO_4 . Empty cells in this and the following tables mean that a component was either not determined or its concentration was below the detection limit.

	Кеткинское месторождение							Пиначево		Город	Радыгино	
Скважина	К-01	К-2	К-4*	К-5	К-6	К-8*	К-23	ГК-1П ^а	Е-1**	Г-1 ^а	Р-2*	Р-3*
Год отбора	2020	2018	1992	2020	2019	1993	2019	2017	1984	2014	1992	1993
t°C отбора	55	38	69	49	43	61	57	17	75	11	7.5	18
pH	7.52	8.2	8.44	8.1	8.76	8.4	8.31	7.55	11	9.1	8.16	7.55
SiO ₂	79	89	35	41	62	32	91	39		2	31	42
NH ₄	6.4		7.2	2.5	2.7	7.1	10	2.8	7.0	8.9	18	30
Na	3539	2710	3276	3220	1354	3288	2683	2830	3072	4740	3680	6667
K	188	98	105	84	26	96	98	95	60	48	43	167
Ca	970	500	650	678	190	693	419	790	952	68	485	679
Mg	2.1	1.8	0.9	0.5	0.1	2.9	3.2	40	16	32	172	234
Cl	7264	5106	6385	5988	2414	6413	4894	5886	6013	7510	6901	12331
SO ₄	173	1.7	37	21	2.4	13	1.0	0.1	114	43	16	2.4
HCO ₃	127	52	35	50	30	39	55	163	80	73	275	144
F	1.8	-	1.6	1.5	1.6	2.0		0.24	0.7	3.8	0.2	0.0
B	24	20	25	31	12	23	19	10		21	34	12
Sr	51	49	54	52	28	54	37	67		25		19
H ₂ S (p-p)	32	6.5	36	9.0	<1	32	0.5	10				0.2
Li	2.3	1.5	1.9	1.9	0.8	2.6	1.6	0.8		3.2	0.8	0.8
Rb		0.14		0.14			1.4	0.06		0.06		
Cs		0.03		0.04			0.04	0.009		0.03		
Fe		0.034		0.016			0.05	0.33		0.14		
Al		0.10		0.056			0.2	0.007		0.15		
Ba	3	2.3		5.0			2.7	12		0.7		
δD	-68	-80 ^{б)}	-74 ^{б)}	-67	-115 ^{в)}		-77	-96 ^{б)}				-56
δ ¹⁸ O	-4.7	-9.1 ^{б)}	-7.1 ^{б)}	-5.2	-14 ^{в)}		-8.7	-11.2 ^{б)}				-4.6
δ ³⁴ S-H ₂ S	+15.4			+8.5								
δ ³⁴ S-SO ₄	+26.4											

Примечания. ^{а)} по данным Копыловой и др., (2018); ^{б)} Чешко (1994); ^{в)} Taran et al., 1997 ^{г)} Кирюхин и др., 2015. *) Средние составы, рассчитанные из данных отчетов^{2,3}. **) Сква. Е-1: температура на забое (3003 м) и состав по данным учетной карточки № 614 (1985).

Notes: ^{а)} data of Kopylova et al., 2018; ^{б)} Cheshko, 1994; ^{в)} Taran et al., 1997; ^{г)} Kiryukhin et al., 2015. *) Mean compositions from reports^{2,3}. **) Composition and temperature at 3003 m depth from Registration card, 1985.

питания, но в среднем близок к значениям $\delta D = -115\text{‰}$ и $\delta^{18}O = -15\text{‰}$ (V-SMOW), что отвечает зонам питания на высотах ~ 2000 м (Чешко, 1994). Воды из скважин заметно изотопно тяжелее и приближаются по изотопному составу к метеорной воде по мере разбавления (рис. 4а, 4б; табл. 2, скважины К-6. Тренд разбавления также виден на зависимости δD от концентрации хлорида (рис. 4б). Здесь следует отметить, что точки δD -Cl для Пиначевской скважины ГК-1П несколько выпадают из общего тренда.

Состав свободных и растворенных газов. В производственных отчетах по бурению скважин в пределах Авачинской депрессии можно найти

большие наборы данных по составу свободных и растворенных газов для большинства скважин. Наши данные и усредненные данные из отчетов^{2,3} приведены в табл. 4. Кроме химического состава, показаны также имеющиеся данные по изотопному составу гелия, углерода CO_2 и CH_4 , а также серы H_2S и растворенного сульфата (табл. 2). Часть данных по изотопии заимствована из работ (Кирюхин и др., 2015; Рожков, Верховский, 1990; Taran, 2009).

Составы газов, так же, как и составы вод, весьма похожи для всех скважин. Это метаново-азотный газ с очень невысоким содержанием CO_2 (<0.5 об. %), с сероводородом (главным

Таблица 3. Микрокомпоненты в водах из скважин Кеткинской площади. Концентрации в мкг/л. Анализы для скважин ГК-1П и Г-1 из работы (Копылова и др. 2018).

Table 3. Trace elements in waters from wells of the Ketkinskaya area. Concentrations in ppb. Analyses for wells ГК-1П and Г-1 are taken from (Kopylova et al., 2018).

	К-23	К-2	К-5	ГК-1П	Г-1
Be	0.14	0.24	0.35	0.07	0.07
Sc	0.07	0.09	0.09	0.5	0.4
Ti	13.3	<3	<3	2.5	0.45
V	1.5	<0.02	<0.02	17	16
Cr	<2	<2	<2	0.6	
Mn	46	67	15	752	33
Co	0.19	<0.03	<0.03	0.04	0.03
Ni	<1	<1	<1	2.5	1.5
Cu	<5	<5	<5	0.65	4.7
Zn	8.8	<1	<1	3.5	45
Ga	0.12	0.09	0.13	0.15	0.2
Ge	4.1	4.0	5.5	1.0	1.2
As	15	1.1	0.4	35	1.8
Se	<0.5	<0.5	<0.5	13	8
Br	10260	10380	12980		
Y	0.38	0.33	0.49	0.22	0.08
Zr	0.44	0.05	0.06	0.08	0.01
Nb	0.06	<0.01	<0.01	0.25	0.13
Mo	0.19	2.3	0.36	0.48	45
Ag	<0.05	<0.05	<0.05	0.25	0.13
Cd	1.2	0.05	2.9	0.01	0.17
Sn	0.26	<0.2	<0.2	0.02	0.3
Sb	0.2	0.2	0.1	0.13	0.4
Te	0.2	0.2	0.6	0.38	0.01
I	5116	4100	8640		
ΣРЗЭ	0.5	<0.4	<0.4	0.2	0.4
Hf	0.01	<0.01	<0.01		
Ta	<0.03	<0.03	<0.03		
W	1.0	1.4	1.3	0.5	0.51
Re	<0.03	<0.03	<0.03		
Tl	0.95	0.10	0.05	0.5	1.3
Pb	3.3	<0.2	<0.2	0.32	1.8
Th	<0.03	<0.03	<0.03	0.25	0.13
U	<0.03	<0.03	<0.03	0.01	0.03

образом, в растворенной форме) и сравнительно высокими (в основном, выше 0.02 об.%, табл. 4) концентрациями гелия. Также характерной особенностью можно считать высокую долю не атмосферного азота, поскольку отношения N_2/Ar в большинстве проб значительно превышают воздушное отношение 83.6. Изотопные отноше-

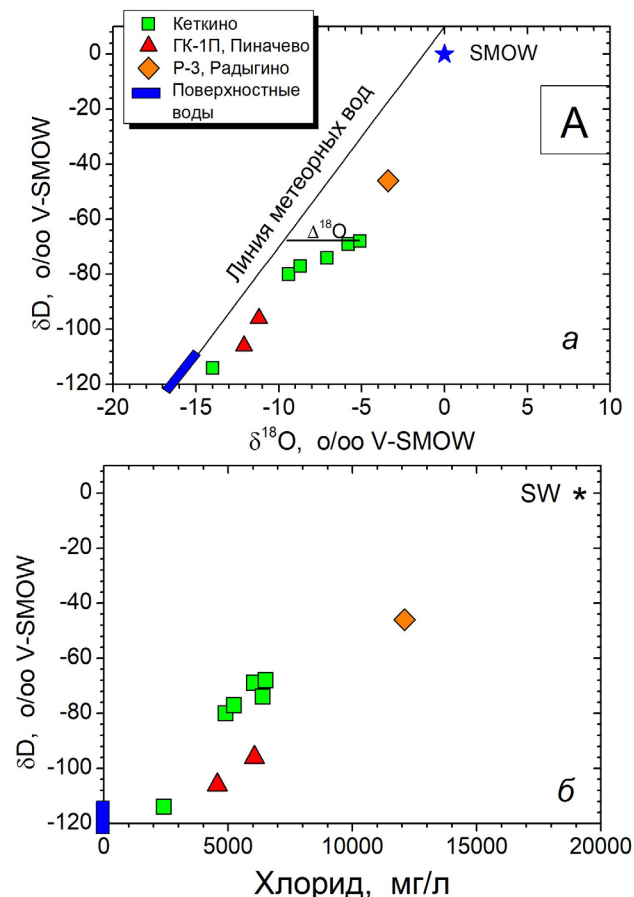


Рис. 4. Диаграмма δD от $\delta^{18}O$ для вод из скважин Авачинской депрессии (а) и корреляция между содержанием хлорид-иона и δD (б) (см. текст). Прямоугольник А отвечает составам магматической воды. SW — морская вода. $\Delta^{18}O$ показывает кислородный изотопный сдвиг на счет изотопного обмена кислорода с породой.

Fig. 4. The $\delta D - \delta^{18}O$ diagram for waters from wells of the Avachinsky depression (a). Correlation between chloride and δD (b) (see text). Area A corresponds to the compositions of magmatic water. SW — seawater. $\Delta^{18}O$ shows the oxygen isotopic shift due to the isotopic exchange of oxygen with rock.

ния гелия, измеренные в газах из скважин К-23, ГК-П1 и Г-1, превышают атмосферное отношение ($2Ra < R < 4Ra$, где R — измеренное отношение $^3He/^4He$, а Ra — атмосферное отношение, равное 1.39×10^{-6} (Мамырин, Толстихин, 1981), но значительно ниже характерных для Камчатки «вулканических» значений около $7.5Ra$ (Рожков, Верховский, 1990; Taran, 2009).

Концентрации углеводородов C_{2+} , т.е. более тяжелых гомологов метана до C_4 (этан, пропан, бутаны) убывают с ростом числа атомов углерода с отношением C_1/C_{2+} от 100 до 6000. Изотопный состав углерода CO_2 и метана, измеренный в пробе газа из скважины К-01, показывает очень низкие значения $\delta^{13}C-CO_2$ (-21‰). Изотопный состав углерода метана, $\delta^{13}C-CH_4$, для всех проб

из скважин Кеткинской площади варьирует в узком интервале от -34% до -39% (табл. 4). Метан из скважины ГК-1П также характеризуется изотопно облегченным углеродом ($\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4 = -57.5\%$). Для скважины Р-3 в работе (Кириухин и др., 2015) приводится значение -61% . Изотопный состав CO_2 в этих двух скважинах также необычно облегчен — ($\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2 = -38\%$ и -49.7% , соответственно (табл. 4).

Изотопный состав серы сероводорода в скважинах К01 и К5 ($\delta^{34}\text{S} = +8.5\%$ и $+15.4\%$) значительно обогащен тяжелым изотопом по сравнению с сероводородом паровых струй и из скважин высокотемпературных гидротермальных систем, например, Мутновского геотермального района, ($\sim 0\%$, Зеленский и др., 2012)). Изотопный состав растворенного сульфата скважины К-01, единственной из Кеткинских скважин, с заметной концентрацией SO_4 (около 150 мг/л (табл. 2)), заметно утяжелен по сравнению с сульфатом морской воды ($+26.3\%$ по сравнению с $\sim +20\%$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Типизация вод Авачинской депрессии. Хлоридно-натриевые воды с минерализацией, схожей с минерализацией исследуемых вод, с высоким содержанием кальция и низким — сульфата, в некоторых случаях можно считать разбавленными рассолами — типичными континентальными подземными водами, которые часто сопутствуют нефтегазоносным горизонтам (Крайнов и др., 2004; Shvartsev, 1998). Различают два основных типа рассолов: (1) инфильтрационные рассолы, образованные в результате растворения пород и минералов галогенных формаций, например, залежей калийных солей, и (2) седиментогенные хлоридные растворы, которые еще называют формационными водами, образованными за счет концентрирования морской воды в захороненных морских осадках и последующего разбавления водами верхних водоносных комплексов (Крайнов и др., 2004). Таким образом, можно полагать, что минеральные воды, вскрытые скважинами в пределах Авачинской депрессии — это частично разбавленные седиментогенные морские воды позднемеловых и возможно более поздних отложений, что согласуется с геолого-тектоническими построениями о позднемеловых окраинных морях Восточной Камчатки (Константиновская, 2003; Шапиро, 1987). Поэтому точки составов вод всех скважин на графике Na-Cl ложатся на одну прямую с наклоном, отвечающим смешению с морской водой (рис. 5а). Воды существенно обогащены кальцием по сравнению с морской водой и на соответствующем графике Ca-Cl (рис. 5б) показывают разные тренды для скважин Кеткино

и Радыгинских скважин Р-2 и Р-3, что может быть связано с различными условиями взаимодействия вода-порода в разных частях бассейна. Воды кеткинских скважин, как уже отмечалось, также отличаются чрезвычайно низкими концентрациями сульфата и магния (табл. 2).

Формационный (седиментогенный) характер вод подтверждается также их изотопным составом (рис. 4а, 4б). Инфильтрационные рассолы, как правило отличаются облегченным изотопным составом вод, поскольку формируются за счет растворения солей инфильтрационными метеорными водами. Формационные воды по изотопному составу близки к захороненным морским водам. Достаточно хорошая корреляция между δD и содержанием хлорида (рис. 4б), позволяет предположить, что воды скважин Авачинской депрессии — это захороненная морская вода, в разной степени разбавленная грунтовыми водами и измененная (метаморфизованная) за счет взаимодействия с породой. Наличие заметного изотопного кислородного сдвига, $\Delta^{18}\text{O}$ (рис. 4а) может указывать на низкое отношение вода-порода в водоносном горизонте. К изменениям следует отнести прежде всего очень высокие абсолютные (до 80 мг/л) и относительные концентрации стронция, с весовым отношением Ca/Sr до 10 (табл. 2). В морской воде это отношение около 50. Высокие концентрации стронция и низкие отношения Ca/Sr характерны для континентальных рассолов (Крайнов и др., 2004; Kharaka et al., 1987). Однако, воды Авачинской депрессии нельзя назвать рассолами. Это высокоминерализованные воды с соленостью ниже солености морской воды (<35 г/л), в различной степени разбавленные грунтовыми водами, и поэтому точки составов этих вод ложатся на линии смешения (рис. 5). Точно так же наблюдается и хорошая корреляционная зависимость между концентрациями кальция и стронция (рис. 6), показывающая, что вскрытые скважинами воды Авачинской депрессии имеют единый источник минерализованных вод.

Этот источник, как уже отмечалось, скорее всего, связан с захороненными морскими водами, т.е. морскими осадками предположительно верхне-мелового возраста. Похожие воды были вскрыты скважинами на Богачевской площади в районе Кроноцкого п-ва в 1940-х гг. (Кудрявцева, 1973) во время поисков и разведки нефти в этом районе. Дискуссию об использовании отношения Ca/Sr в качестве индикатора формирования состава вод можно найти в работе (Peiffer et al., 2011 и ссылки в этой работе). В цитируемой статье речь идет о необычных горячих водах (до 80°C) высокой минерализации, до 15 г/л, нагретых магматическими телами вблизи

МИНЕРАЛЬНЫЕ ВОДЫ АВАЧИНСКОЙ ДЕПРЕССИИ

Таблица 4. Химический (объемные %) и изотопный ($^3\text{He}/^4\text{He}$, $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ и $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$) составы свободного (и растворенного, скв. Г-1) газа из скважин Авачинской депрессии.

Table 4. Chemical (vol %) and isotopic ($^3\text{He}/^4\text{He}$, $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ и $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$) compositions of free (dissolved for well G-1) gas from wells of the Avachinsky Depression.

Скважина	К-01	К-2	К-4А	К-5	К-6	К-8	К-23	ГК-1П	Г-1 раств.	Р-3 ^{а)}
Год отбора	1992	2020	1992	2020	1992	2020	2020	2020	2016	1992
He	0.033	0.029	0.027	0.036	0.021	0.036	0.022	0.031	0.0005	0.009
H ₂		0.002	0.008			0.002	0.005	0.041	0.0002	0.010
CO ₂	1.27	0.07	0.43	1.1	3.35	0.014	0.02	0.22	0.88	0.18
H ₂ S						0.25				
N ₂	19.2	21.5	28.2	28.9	36.2	21.2	17.1	19.4	57.1	26.5
Ar	0.036	0.056	0.09	0.08	0.33	0.056	0.053	0.15	0.83	0.022
CH ₄	80.5	78.0	70.2	69.9	60.1	77.7	82.6	80.0	25.3	73.3
C ₂ H ₆		0.25		0.071			0.09	0.033	0.013	
C ₃ H ₈		0.0026		0.0021			0.0015	0.0005	0.001	
ΣC ₄ H ₁₀		0.00013		0.00003			0.00007	0.00003	0.0005	
C ₂ H ₄										
C ₃ H ₆				0.0017				1e-6	0.0002	
C ₁ /C ₂₊		312		1100			901	2424	1946	
δ ¹³ C-CH ₄		-39.5	-37.0	-36.3			-39.3	-57.5		-61
δ ¹³ C-CO ₂		-21						-38		-49.7
³ He/ ⁴ He (R/Ra)		3.7						2.6	3.1	
⁴ He/ ²⁰ Ne		365						73	205	
N ₂ /Ar	530	378	313	361	110	379	323	51	69	1204

Примечание. ^{а)} Состав газа из (Рожков, Верховский, 1990); изотопный состав из работы (Кирюхин и др. 2015).

Notes: Gas composition from (Rozhkov and Verkhovsky, 1990); isotopic composition from (Kiryukhin et al. 2015).

вулкана Эль Чичон (Мексика), но сформированными в верхней части мелового фундамента, в пределах нефтегазоносной зоны, глубже 2000 м от поверхности. Ca-Sr соотношение для этих вод также показано на рис. 6. Интересно, что эта точка лежит на том же тренде, что и точки составов вод Авачинской депрессии. Дискуссия в статье (Peiffer et al., 2011) была подкреплена данными по изотопному составу стронция. К сожалению, нам пока не удалось выполнить анализы $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для исследуемых вод.

Микрокомпоненты. Из-за того, что воды из скважин Авачинской депрессии слабощелочные, с pH достигающем 9, содержания металлов в этих водах очень низкие, как правило ниже десятков мкг/л, часто ниже уровня определения (табл. 3). Как уже отмечалось, концентрации индикаторных компонентов (редкие щелочи, Ba) показаны отдельно, в табл. 2. При этом стронций для вод Авачинской депрессии, с концентрациями до 80 мг/л, может считаться макрокомпонентом. Относительные концентрации Ca, Ba и Sr, а также Li, Rb и Cs (рис. 7 а, б) показаны вместе с областями составов для средней коры, а также карбонатных пород для щелочно-земельных элементов (Справочник..., 1990). Кроме того, показаны составы редких щелочей в термальных

водах Камчатки, согласно работе (Арсанова, 1974).

Систематических данных по содержаниям Sr и Ba в термальных водах Камчатки мы не нашли. Геохимия стронция и бария в континентальных рассолах была достаточно подробно рассмотрена еще в работах С.Л. Шварцева с соавторами (Крайнов и др. 2004; Шварцев, 1973). Источником стронция в рассолах, как правило, служат карбонатные породы, а источником бария — силикаты. Поэтому в разных литологиях отношение Sr/Ba может меняться значительно, и на треугольной диаграмме Ca-Sr-Ba относительные составы будут лежать очень близко к оси Sr-Ba (рис. 7а). Точки составов для вод Авачинской депрессии также лежат близко к этой оси, но также и близко к области составов средней коры (Справочник..., 1990). Для этих вод можно предположить, что источником стронция служит в основном захороненная морская вода и морские осадки, а барий поступает в основном из вмещающих пород.

Воды из скважин Авачинской депрессии также характеризуются сравнительно высокими концентрациями брома и иода — до 12 мг/л и до 9 мг/л, соответственно (табл. 3). Геохимия брома и иода в формационных водах достаточно подробно обсуждается в монографии (Крайнов

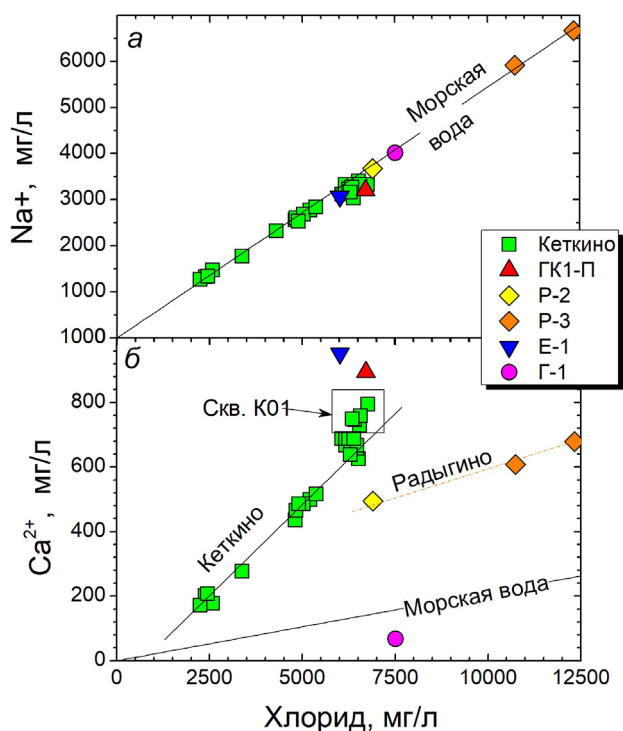


Рис. 5. Классификация вод из скважин Авачинской депрессии на основе корреляции между хлоридом, натрием (а) и кальцием (б).

Fig. 5. Systematics of waters from wells of the Avachinsky depression based on correlation between chloride, sodium (a) and calcium (b).

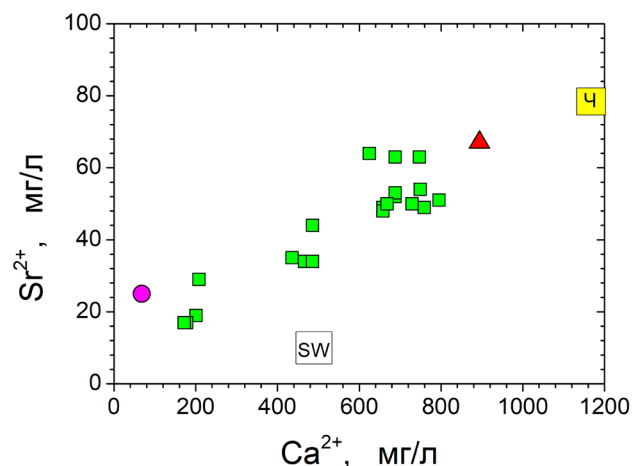
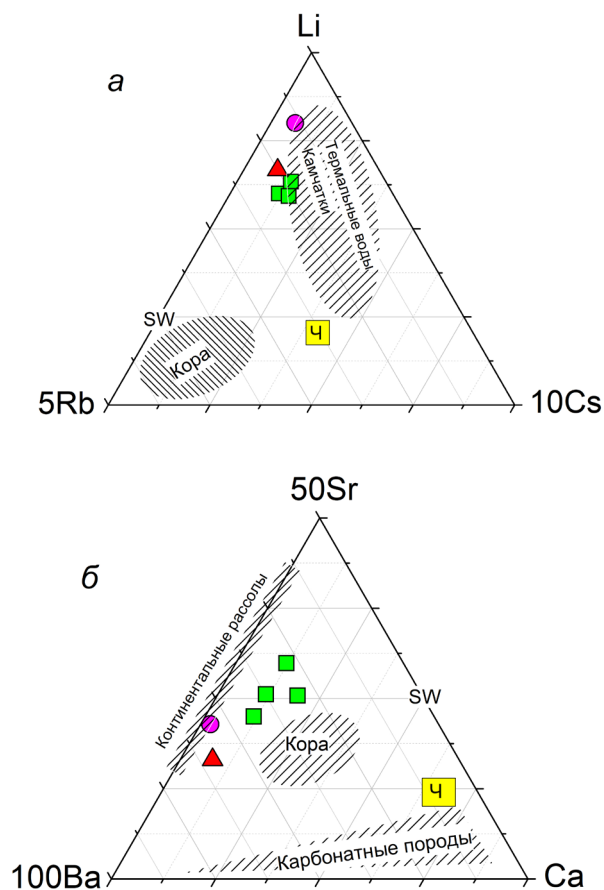


Рис. 6. Корреляция между содержаниями кальция и стронция в водах глубоких скважин Авачинской депрессии. Условные обозначения см. на рис. 5. SW — морская вода; Ч — источник в районе вулкана Эль Чичон, Мексика.

Fig. 6. Correlation between contents of calcium and strontium in waters of deep wells of the Avachinsky depression. Symbols as in Fig. 5. SW — seawater; Ч — spring near El Chichon volcano, Mexico.

и др., 2004). Источником бромид-иона служит захороненная, частично потерявшая пар, морская вода, а источником иода — захороненное органическое вещество морского происхождения. Другими словами, содержание таких индикаторных компонентов как стронций, бром и иод указывает на морское происхождение минеральных вод Авачинской депрессии.

Геотермометрия. Как уже было отмечено, вода Кеткинских скважин существенно обеднена магнием. Очень низкие содержания магния в термальных водах, как правило, свидетельствуют о высокой температуре формирования. Гиггенбах (Giggenbach, 1988) предложил так называемый магниевый геотермометр, основанный на равновесии между раствором и набором минералов, характерных для пропилитовой фации изменений (К-шпат, хлорит, мусковит, кварц/халцедон):

Рис. 7. Относительные концентрации Ca, Sr, Ba (а) и Li, Rb, Cs в скважинных водах Авачинской депрессии (б). Показаны также примерные составы аналогичных вод в районе вулкана Эль Чичон, Мексика, (Ч), состав морской воды и области составов характерных резервуаров. Условные обозначения см. на рис. 5.

Fig. 7. Relative concentrations of Ca, Sr, Ba (a) and Li, Rb, Cs in waters from wells of the Avachinsky depression (b). Also are show the mean compositions of similar waters near El Chichon volcano, Mexico (Ч), seawater composition (SW) and areas for compositions of characteristic reservoirs. Symbols as in Fig. 5.

$$t^{\circ}\text{C}(\text{K-Mg}) = 4410/(14 - \log(\text{K}^2/\text{Mg})) - 273, \quad (1)$$

где элементы обозначают их концентрации в растворе в мг/л. С другой стороны, температуру равновесия на глубине можно оценить, используя Na-K геотермометр:

$$t^{\circ}\text{C}(\text{Na-K}) = 1390/(1.75 + \log(\text{Na/K})) - 273, \quad (2)$$

построенный в той же работе по равновесию раствора с парой альбит-К-шпат. Воды из глубоких скважин высокотемпературных гидротермальных систем, таких как Мутновская на Камчатке, находятся в равновесии с породой, и поэтому температуры, рассчитанные по этим двум геотермометрам оказываются близкими. В большинстве случаев составы воды горячих источников показывают Na-K температуры существенно выше K-Mg температур, что связано со скоростью установления равновесия: в системе K-Mg оно устанавливается гораздо быстрее, чем в системе Na-K. Т. е. по мере подъема воды к поверхности и падения температуры магний быстро переходит в раствор из вмещающих пород, а отношение Na/K сильно измениться не успевает. Эти соображения легли в основу широко используемой треугольной диаграммы Гиггенбаха (Giggenbach, 1988) «K-Na/100-Mg^{1/2}», которую можно иначе представить прямоугольным графиком зависимости $\log(\text{Na/K})$ от $\log(\text{K}^2/\text{Mg})$, (рис. 8). На графике показано, что точки составов воды из Кеткинских скважин ложатся близко к линии «полного равновесия», в районе температуры 150°C. Точки для остальных скважин ложатся в область «частичного равновесия» при более низких температурах. Точки составов воды скважин Е-1 и ГК-1П, пробуренных вблизи Кеткинской площади, ложатся ближе к точкам кеткинских скважин, чем точки для скважин Г-1, Р-2 и Р-3, расположенных в десятках километрах дальше к востоку. Таким образом, можно утверждать, что в районе Кеткинской площади региональные седиментогенные воды подвергаются локальному нагреванию до температуры ~150°C. Источником тепла, вероятнее всего, служит интрузивное образование, связанное с магматическими питающими системами близ расположенных вулканов Корякский и Авачинский. На какой глубине находится эта интрузия и до какой глубины распространены водовмещающие толщи — эти вопросы пока остаются без ответов.

Температура около 150°C продуктивной зоны Кеткинского месторождения может быть подтверждена еще одним способом — расчетом так называемых индексов насыщения для потенциальных минералов, которые могут высадиться из раствора при разных температурах. Индекс насыщения определяется как:

$$\text{SI} = \log(\text{Q/K}), \quad (3)$$

где Q — произведение активностей ионов в растворе данного состава, а K — теоретическое

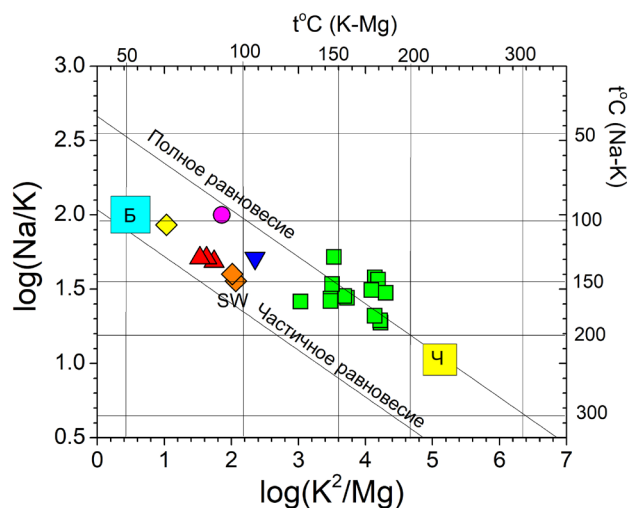


Рис. 8. Диаграмма Na-K-Mg для вод Авачинской депрессии. Модифицировано на основе диаграммы Гиггенбаха (Giggenbach, 1988). Условные обозначения см. на рис. 5. SW — морская вода; Ч — источники на вулкане Эль Чичон (Peiffer et al., 2011); Б — вода скважин Богачевской площади (Кудрявцева, 1973).

Fig. 8. The Na-K-Mg diagram for waters of the Avachinsky depression. Modified from (Giggenbach, 1988). Symbols as in Fig. 5. SW — seawater; Ч — spring near El Chichon (Peiffer et al., 2011); Б — water from wells of the Bogachevsky area (Kudryavtseva, 1973).

произведение растворимости для данного минерала. При $\text{SI} = 0$ раствор насыщен по отношению к данному минералу. При $\text{SI} < 0$ — недосыщен и при $\text{SI} > 0$ — пересыщен. Расчет проведен, используя программу SOLVEQ (Reed, Spycher, 1984) для состава скважины К-01, как наиболее глубокой и имеющей на забое температуру около 80°C (табл. 1). Расчет оказался возможным, поскольку были проанализированы алюминий и железо (рис. табл. 2). Результаты показаны на рис. 9. Из рисунка следует, что вода скважины К-01 равновесна с набором наиболее типичных гидротермальных минералов (силикатов) при температуре около 150°C, т.е. при температуре, уже оцененной с помощью диаграммы Гиггенбаха (рис. 8). Таким образом, две простые независимые термодинамические оценки могут служить достаточно убедительным аргументом в пользу существования в районе Кеткинской площади на некоторой глубине водного горизонта с температурой не ниже 150°C. Интересно, что железосодержащие минералы, главным образом, окислы, показывают температуру равновесия с раствором, близкую к температуре, зарегистрированной на забое скважин (рис. 9б). По-видимому, это как-то связано с материалом обсадных колонн скважин. Следует также добавить, что вода из скважины К-01, независимо от температуры, пересыщена по отношению к пириту (FeS_2), бариту (BaSO_4), стронцианиту (SrCO_3) и целестину (SrSO_4).

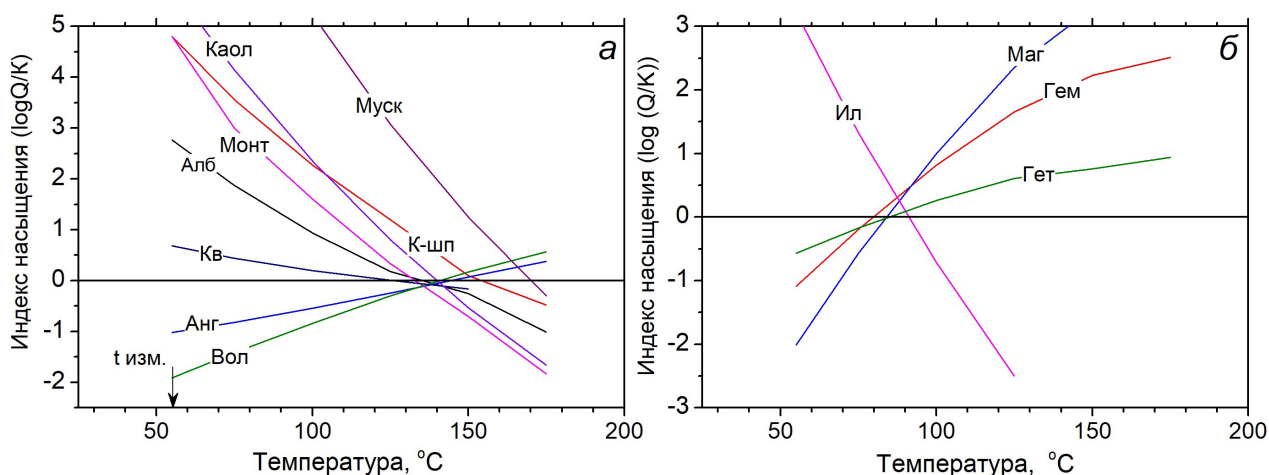


Рис. 9. Индексы насыщения раствора скважины К-01 в зависимости от температуры. Алумосиликаты (а), окислы + иллит (б). Сокращения: Муск — мусковит; Каол — каолинит; К-шп — К-шпат; Монт — Na-монтмориллонит; Алб — альбит; Кв — кварц; Анг — ангидрит; Вол — волластонит; Ил — иллит; Мар — магнетит; Гем — гематит; Гет — гетит.

Fig. 9. Saturation indices for the solution of well # K01 in dependence on temperature. Aluminosilicates(a); oxides + illite (б). Abbreviations: Муск — muscovite; Каол — kaolinite; К-шп — K-Spare; Монт — Na-montmorillonite; Алб — albite; Кв — quartz; Анг — anhydrite; Вол — wollastonite; Ил — illite; Мар — magnetite; Гем — hematite; Гет — goethite.

Формирование газового состава. Как уже отмечалось, характерной особенностью газов из всех рассмотренных скважин Авачинской депрессии, кроме преобладающего содержания метана, является высокое относительное содержание не атмосферного азота. Это показано на треугольной диаграмме на рис. 10. Отношение N_2/Ar в некоторых газах выше 500, т.е. более 80% азота в этих газах имеет не атмосферное происхождение. Источником азота и аргона в газах термальных вод служит главным образом воздух, растворенный в воде, питающей гидротермальную систему. Но часть азота может поступать в воду из вмещающих пород, а часть может иметь более глубинное происхождение, т.е. поступать из более глубоких горизонтов коры или даже из мантии (Прасолов 1990). Наиболее вероятный источник не атмосферного азота в минеральных водах Авачинской депрессии тот же, что и источник метана, а именно, захороненное вместе с морскими осадками органическое вещество. Можно отметить также сравнительно высокие концентрации гелия в газах. Несколько определений изотопного состава гелия в скважинах Авачинской депрессии, приведенных в монографии (Рожков, Верховский, 1990), показали достаточно высокую долю мантийного гелия в тех газах, где эти отношения измерялись (табл. 4). Самое высокое значение, $3.7Ra$ (Ra — воздушное отношение, 1.4×10^{-6}) получено для кеткинской скважины К-2. Чуть ниже, $2.6Ra$, получено для Пиначевской скважины ГК-1П, пробуренной близко от Кеткинской площади и ближе к Корякскому вулкану (рис. 2). Однако

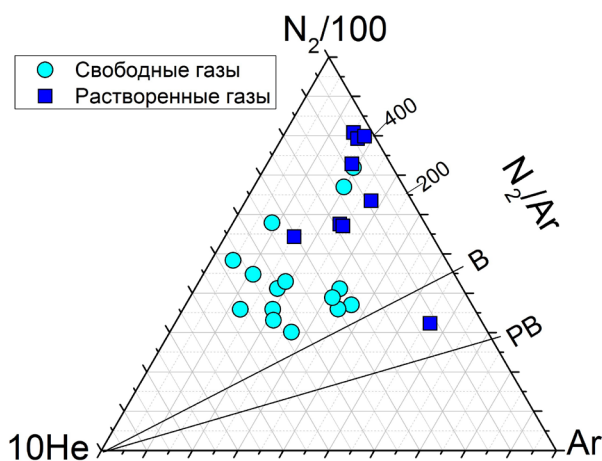


Рис. 10. Диаграмма относительных концентраций гелия, аргона и азота (Giggenbach, 1991) в скважинах Авачинской депрессии. В — воздух и РВ — растворенный воздух.

Fig. 10. Ternary diagram for relative concentrations of helium, argon and nitrogen (Giggenbach, 1991) in wells of the Avachinsky depression. В — air and РВ — dissolved air.

и в «городской» скважине Г-1, пробуренной в 30 км на юго-восток, отмечено высокое отношение $^3He/^4He - 3.1Ra$. Эти данные говорят о достаточно высокой проницаемости (раздробленности) коры в пределах Авачинской депрессии, что позволяет магматическому гелию подниматься до сравнительно неглубоко залегающих водоносных горизонтов.

Углеводородная часть газов представлена главным образом метаном и характеризуется

высокими отношениями C_1/C_{2+} . Низкие отношения (<100) соответствуют «термогенным» углеводородам, образованным за счет термического разложения захороненного органического вещества. Более высокие отношения C_1/C_{2+} могут быть результатом дополнительного биогенного образования метана метан-генерирующими бактериями (Procesi et al. 2019; Schoell, 1988; Taran, Giggenbach, 2003 и ссылки в этих работах). Отношение C_1/C_{2+} служит индикатором так называемой «сухости» (dryness) природного газа, что говорит не о проценте влажности в нашем понимании, а о доли метана в смеси углеводородов. Чем выше эта доля, тем больше «сухость». В этом смысле газы Кеткинской площади, а особенно, газ из скважины Р-3 Радыгинской площади, весьма «сухие». «Сухость» может обеспечиваться как преобладающей долей бактериального метана, так и композиционным фракционированием за счет диффузии. Основным индикатором происхождения метана и углеводородов служит изотопный состав углерода. Термогенный метан изотопно утяжелен и имеет $\delta^{13}C$ выше -40% . Биогенный метан значительно облегчен, до величин $\delta^{13}C = -80\%$ (Schoell, 1988). Метан высокотемпературных гидротермальных систем Камчатки (Мутновская, Узон-Гейзерная и др.) имеет термогенную природу и характеризуется величинами $\delta^{13}C > -25\%$ (Бескровный и Лобков, 1979; Зеленский и др. 2012; Таран, 1988). Наши данные по скважинам К-01, К-2, К-5 и К-23 и данные по скважине К-2 (Кирюхин и др. 2015) показывают, что метан Кеткинской площади имеет «термогенный» изотопный состав, с $\delta^{13}C$ от -34% до -39% (табл. 4). По данным из работы (Кирюхин и др., 2015) метан из скважины Р-3, а также метан из скважины ГК-1П (данные настоящей работы) характеризуется «биогенным» составом с $\delta^{13}C = -61\%$ и -57.5% , соответственно. При практически одинаковом составе газов из всех опробованных скважин этот факт кажется необычным. Возможно, это связано с различной степенью преобразования органического вещества в морских осадках в зависимости от температуры. Локальный прогрев в районе Кеткинской площади каким-то образом приводит к изотопному «утяжелению» образованного метана. Необходимо больше данных по изотопному составу углерода и водорода, включая изотопный состав гомологов метана, чтобы разобраться в источниках и механизмах образования метана и углеводородов в недрах Авачинской депрессии. С другой стороны, данные по изотопному составу серы растворенного сульфата и сероводорода в воде и газах Кеткинской площади (табл. 2) свидетельствуют о так называемом TSR-механизме образования сероводорода (Kyousu, 1980; Machel et al., 1995) — термогенной сульфат-редукции.

Если при биогенной сульфат-редукции сульфидная сера оказывается значительно облегченной, до -40% CDT, как это подробно изучено (Johnson et al., 2007) и показано, например, для пиритов Двухъярточных источников на Камчатке (Таран и др., 2020), то при термогенной сульфат-редукции сульфидная сера оказывается изотопно утяжеленной. В нашем случае сероводород в скважинах К-01 и К-5 имеет $\delta^{34}S = +8.5\%$ и $+15.4\%$ при $\delta^{34}S$ растворенного сульфата $+26.4\%$, что заметно выше значения для морского сульфата ($\sim +20\%$). Другими словами, изотопный состав серы наряду с геотермометрией подтверждает наличие существенно прогретого участка в районе Кеткинской площади. Помимо сульфат-редукции, сероводород может также участвовать в восстановлении CO_2 (карбонатов) до метана, о чем говорит чрезвычайно изотопно-облегченный углерод CO_2 (табл. 4).

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ И НЕРЕШЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Поскольку глубокими скважинами в пределах Авачинской депрессии на протяжении более 50 км вскрываются минерализованные воды близкие по химическому и газовому составу, то можно утверждать о наличии протяженного бассейна подземных вод, циркулирующих, судя по имеющимся геологическим разрезам скважин, в пределах водоносного горизонта палеоген-неогеновых, до верхнемеловых пород (рис. 2, 3). Только в северо-западной части бассейна, в пределах Кеткинской площади и высоты 202, возле которой пробурена Пиначевская скважина ГК-1П (рис. 2), имеется поверхностная разгрузка этих вод. Это Пиначевские источники и скрытая разгрузка в районе Кеткинской площади, проявляющаяся в гидрохимии поверхностных водотоков и озер². Разгружающиеся воды сильно разбавлены, с температурой видимой разгрузки ниже $15^\circ C$. Это значит, что только в этом районе локальная тектоника обеспечивает проницаемость для подъема к поверхности вод глубинного формирования. На юго-востоке бассейна, в районе г. Петропавловска-Камчатского и на Радыгинской площади, температуры, измеренные на забое скважин, глубже 1500 м (около $30^\circ C$), соответствуют пониженному геотермальному градиенту, т.е. здесь нет никаких термоаномалий и, соответственно, гидротермальных резервуаров на доступных бурению глубинах.

Термальные воды, вскрытые на Кеткинской площади, вероятнее всего кондуктивно нагреваются остывающим магматическим телом, внедренным на глубину ниже водоносного комплекса, в котором циркулируют минерализованные воды. Возможно, что это интрузивное

образование ответственно также за локальную раздробленность вышележащего участка коры, обеспечивающую скрытую и открытую разгрузки. Эта раздробленность может быть распространена также вплоть до выводящего канала Корякского вулкана. Об этом свидетельствует необычно высокое содержание метана в газе Корякской фумаролы (Таран, 1985; Taran et al., 1997).

Кроме проблемы источника тепла для термальных вод Кеткинской площади, которая решается благодаря безусловному наличию остывающих субвулканических тел, имеется проблема существования бассейна вод, характерных для нефтегазоносных структур, что гораздо сложнее. Не исключено, что Авачинская депрессия (Авачинский грабен по (Мороз, Гонтовая, 2003)) может содержать толщи захороненных осадков окраинных морей (мел-палеогенового возраста?), генерирующих существенные количества природного газа. Для того, чтобы подойти к решению этих проблем с точки зрения геохимии, необходимо, на наш взгляд, провести дополнительное детальное изотопно-геохимическое исследование скважинных растворов и газов. Это исследование должно включать анализы изотопного состава флюидов из всех скважин: воды, серы растворенного сульфата и сероводорода, растворенного стронция, бора, углерода и водорода метана и его гомологов, азота, гелия и аргона. Необходимо также провести параллельное исследование скважинных флюидов Богачевской площади и термопроявлений Тюшевского прогиба, чтобы понять в комплексе происхождение и потенциал этих необычных для Восточной Камчатки проявлений.

ВЫВОДЫ

В пределах Авачинской депрессии от Кеткинской площади на северо-западе до Родыгинской площади на юго-востоке, скважинами на глубинах ниже 1000 м вскрыты минерализованные воды примерно одинакового химического состава, в свободном газе которых преобладает метан.

Только скважины Кеткинской площади выводят на поверхность термальные воды и имеют высокие, до 80°C, температуры на забое.

Химический состав воды Кеткинских скважин показывает равновесие с гидротермально измененной породой при температуре примерно 150°C. Состав воды других скважин показывает отсутствие равновесия с породами и более низкие температуры, оцененные по гидрохимическим показателям.

Изотопные характеристики воды и газов из Кеткинских скважин соответствуют разбавлению захороненных морских вод поверхностными

водами и термогенному происхождению метана и сероводорода. Изотопный состав гелия в газах показывает значительный вклад мантийного (магматического) гелия во всех опробованных скважинах.

Наиболее вероятная причина существования термальных вод Кеткинской площади — локальное кондуктивное нагревание вод бассейна остывающим субвулканическим телом, вероятно связанным с магматической питающей системой Корякского вулкана.

Необходимы дополнительные изотопно-геохимические исследования для понимания общих проблем формирования бассейна минерализованных вод с газом метанового состава, типичных для нефтегазоносных обстановок, но в районе активного вулканизма Восточной Камчатки.

Авторы благодарят О.И. Окину за помощь в проведении химических анализов, а также Р.Р. Курмашову за помощь при подготовке рукописи к печати. Замечания и комментарии рецензентов и редакторские правки В.А. Рашидова значительно улучшили первоначальный текст статьи. Изотопные определения проводились в рамках проекта РНФ 18-17-00245.

Список литературы [References]

- Арсанова Г.Н. Редкие щелочи в термальных водах вулканических областей. Новосибирск: Наука, 1974. 101 с. [Arsanova G.N. Rare alkalies in thermal waters of volcanic areas. Novosibirsk: Nauka, 1974. 101 p. (in Russian)].
- Бескровный Н.С., Лобков В. А. Закономерности распределения углеводородных газов в современных гидротермальных системах Камчатки // Гидротермальный процесс в областях тектономагматической активности. М.: Наука, 1977. С. 110–119 [Beskrovny N.S., Lobkov V.A. On the distribution of hydrocarbon gases in the modern hydrothermal systems of Kamchatka. In: Hydrothermal process in areas of the tectono-magmatic activity. Moscow: Nauka, 1977. P. 110–119 (in Russian)].
- Зеленский М.Е., Таран Ю.А., Дубинина Е.О. и др. Источники летучих компонентов вулкана зоны субдукции: Мутновский вулкан, Камчатка // Геохимия. 2012. № 6. С. 555–575 [Zelenski M.E., Taran Y.A., Dubinina E.O. et al. Sources of volatiles for a subduction zone volcano: Mutnovsky volcano, Kamchatka // Geochemistry. 2012. № 6. P. 555–575 (in Russian)].
- Кирюхин А.В., Манухин Ю.Ф., Федотов С.А. и др. Геофлюиды Авачинско-Корякского вулкано-генного бассейна, Камчатка // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2015. № 5. С. 400–414 [Kiryukhin A.V., Manukhin Yu. F., Fedotov S.A. et al., Geofluids of the Avachisky-Koryaksky volcanogenic basin, Kamchatka // Geoecology, Engineering Geology, Hydrogeology and Geocryology. 2015. № 5. P. 400–414 (in Russian)].

- Константиновская Е. А. Тектоника восточных окраин Азии: структурное развитие и геодинамическое моделирование. М.: Научный мир, 2003. 223 с. [Konstantinovskaya E.A. Tectonics of the Western margins of Asia: structural evolution and geodynamic modeling. Moscow: Nauchny Mir, 2003. 223 p.].
- Копылова Г.Н., Гусева Н.В., Копылова Ю.Г., Болдина С.В. Химический состав подземных вод режимных водопроявлений Петропавловского геодинамического полигона: типизация и эффекты сильных землетрясений // Вулканология и Сейсмология. 2018. № 4. С. 43–62 [Kopylova G.N., Guseva N.V., Kopylova Yu.G., Boldina S.V. Chemical composition of groundwaters of the Petropavlovsk geodynamic polygon: systematics and effect of strong earthquakes // Volcanology and Seismology. № 4. P. 43–62 (in Russian)].
- Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швеиц В.М. Геохимия подземных вод. М.: Наука, 2004. 677 с. [Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shveys V.M. Geochemistry of ground waters. Moscow: Nauka, 2004. 677 p.].
- Кудрявцева Е.И. К вопросу о гидрогеологических критериях перспектив нефтегазоносности Камчатки // Труды ВНИГРИ. 1973. Вып. 338. С. 124–128 [Kudryavtseva E.I. On hydrogeological criteria of the perspectives of the oil-gas potential for Kamchatka. Trudy VNIGRI. 1973. V. 338. P. 124–128 (in Russian)].
- Мамырин Б.А., Толстихин И.Н. Изотопы гелия в природе. М.: Энергоиздат, 1981. 224 с. [Mamyrin B.A., Tolstikhin I.N. Helium isotopes in Nature. Moscow: Energoizdat, 1981. 224 p. (in Russian)].
- Манухин Ю.Ф., Павлова Л.Е. Типизация гидрогеологических структур вулканических районов Камчатки и характеристика вулканогенных бассейнов // Вулканология и Сейсмология. 2011. № 3. С. 13–33 [Manukhin Yu.F., Pavlova L.E. Classification of Hydrogeological features in volcanic areas of Kamchatka and a characterization of volcanogenic basins. Volcanology and Seismology. 2011. № 3. P. 13–33 (in Russian)].
- Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И. Глубинное строение района Авачинско-Корякской группы вулканов по геофизическим данным // Вулканология и сейсмология. 2003. № 4. С. 3–10 [Moroz Y.F., Gontovaya L.I. Deep structure of the Avachinsky-Koryaksky group of volcanoes based on geophysical data. Volcanology and seismology. 2003. № 4. P. 3–10 (in Russian)].
- Писарева М.В. Зона природного пара Нижне-Кошелевского геотермального месторождения // Вулканология и сейсмология. 1987. № 2. С. 52–63 [Pisareva M.V. Zone of the natural steam of the Nizhne-Koshelevsky geothermal field // Volcanology and Seismology. 1987. № 2. P. 52–63 (in Russian)].
- Поздеев А.И. Углеводородная газогенерация Авачинской депрессии Камчатки, ее перспективы и связь с сейсмичностью // Вулканология и сейсмология. 2003. № 6. С. 44–54 [Pozdeyev A.I. Hydrocarbon gas generation of the Avachinsky depression in Kamchatka; Its perspectives and relation to the seismicity // Volcanology and Seismology. 2003. № 6. P. 44–54].
- Попруженко С.В., Апрелков С.Е. Строение фундамента Авачинской депрессии // Вулканология и сейсмология. 1997. № 6. С. 15–24 [Popruzhenko S.V., Aprelkov S.E. Structure of the basement of the Avachinsky depression // Volcanology and seismology. 1997. № 6. P. 15–24 (in Russian)].
- Прасолов Э.М. Изотопная геохимия и происхождение природных газов. Л.: Недра, 1990. 283 с. [Prasolov E.M. Isotope geochemistry and origin of natural gases. Leningrad: Nedra, 1990. 283 p. (in Russian)].
- Рожков А.М., Верховский А.Б. Геохимия благородных газов высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1990. 167 с. [Rozhkov A.M., Verkhovsky A.B. Noble gas geochemistry in high-temperature hydrothermal systems. Moscow: Nauka, 1990. 167 p. (in Russian)].
- Справочник по геохимии. М.: Недра, 1990. 480 с. [Handbook on geochemistry. Moscow: Nedra. 1990. 460 p. (in Russian)].
- Таран Ю.А., Пилипенко В.П. Гидротермальные растворы и газы первых продуктивных скважин Мутновского парогидротермального месторождения // Геохимия. 1984. № 7. С. 25–38 [Taran Y.A., Pilipenko V.P. Hydrothermal solutions and gases of the first productive wells of the Mutnovsky geothermal system // Geochemistry. 1984. № 7. P. 25–38 (in Russian)].
- Таран Ю.А. Фумарольная активность Корякского вулкана в 1983 г. // Вулканология и Сейсмология. 1985. № 3. С. 83–87 [Taran Y.A. Fumarolic activity of the Koryak volcano in 1983 // Journal of Volcanology and Seismology. 1985. V. 7 P. 439–446 (cover-to-cover translation)].
- Таран Ю.А. Геохимия геотермальных газов. М.: Наука, 1988. 169 с. [Taran Y.A. Geothermal Gas Geochemistry. Moscow: Nauka, 1988. 169 p. (in Russian)].
- Таран Ю.А., Юрова Л.М., Кирсанова Т.П. и др. Киреунские и Двухъярточные источники Срединного хребта Камчатки: геология, геохимия и геотермия. Вестник Краунц. 2020. Вып. 47 № 3. С. 5–24 [Taran Y.A., Yurova L.M., Kirsanova T.P. et al. Kireunskie and Dvukhyurtchnye springs of the Sredinny Range in Kamchatka: geology, geochemistry and geothermy. // Vetsnik KRAES. 2020, V. 47(3). P. 5–25. (in Russian)]
- Трухин Ю.П. Геохимия современных гидротермальных процессов и перспективные технологии. М.: Наука, 2003. 430 с. [Trukhin Yu.P. Geochemistry of modern hydrothermal processes and perspective technologies. Moscow: Nauka, 2003. 403 p. (in Russian)].
- Трухин Ю.П., Шувалов Р.А. Современный гидротермальный процесс в областях эволюции вулканизма. М.: Наука, 1979. 135 с. [Trukhin Yu.P., Shuvalov R.A. Modern hydrothermal process in areas of the volcanic evolution. Moscow: Nauka, 1979. 135 c. (in Russian)].
- Чешко А.Л. Формирование основных типов термальных вод Курило-Камчатского региона по данным изотопных исследований (D, ^{18}O , $^3\text{He}/^4\text{He}$) // Геохимия. 1994. № 7. С. 988–1001 [Cheshko A.L. The formation of the main types of thermal waters of the Kuril-Kamchatka region based on the isotopic studies (D, ^{18}O , $^3\text{He}/^4\text{He}$) // Geochemistry. № 7. P. 988–1001 (in Russian)].
- Шапино М.Н. Очерки тектонического развития Камчатки. М.: Наука, 1987, 246 с. [Shapiro M.N. Essays on

- the tectonic evolution of Kamchatka. Moscow: Nauka, 1987. 246 p. (in Russian)].
- Шварцев С.Л.* Источники кальция, стронция и бария крепких и сверх крепких рассолов хлоридно-кальциевого типа. // Геология и геофизика. 1973. № 6. С. 23–30 [*Shvartsev S.L.* Sources of Ca, Sr and Ba in strong and super-strong brines of the chloride-calcium type // *Geology and Geophysics*. 1973. № 6. P. 23–30 (in Russian)].
- Шеймович В.С.* Объяснительная записка. М. 2000. 302 с. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 200 000. Серия Южно-Камчатская. М. 2000 [*Sheymovich V.S.* Explanation to the State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200 000. Serie South Kamchatka. Moscow. 2000.302 p. (in Russian)].
- Giggenbach W.F.* Chemical techniques in geothermal exploration. In: D'Amore, F. (Ed.), *Application of Geochemistry of Geothermal Reservoir Development*. UNITAR/UNDP. 1991. Rome. P. 119–144.
- Giggenbach W.F.* Geothermal solute equilibria. Derivation of Na–K–Mg–Ca geoindicators // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1988. V. 52. P. 2749–2765.
- Johnston D.T., Farquhar J., Canfield D.E.* Sulfur isotope insights into microbial sulfate reduction: When microbes meet models // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2007. V. 71. P. 3929–3947.
- Kharaka Y.K., Maest A.S., Carothers W.W. et al.* Geochemistry of metal-rich brines from central Mississippi Salt Dome // *Applied Geochemistry*. 1987. V. 2. P. 543–561.
- Kiyosu, Y.* Chemical reduction and sulfur isotope effects of sulfate by organic matter under hydrothermal conditions. *Chemical Geology*. 1980. V. 30. P. 47–56.
- Machel HG, Krouse HR, Sassen R.* Products and distinguishing criteria of bacterial and thermochemical sulfate reduction. *Applied Geochemistry*. 1995. V. 10. P. 373–389.
- Peiffer L., Taran Y., Lounejeva E. et al.* Tracing thermal aquifers of El Chichon volcano–hydrothermal system (Mexico) with $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, Ca/Sr and REE // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2011. V. 20. P. 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.06.004>
- Procesi M., Ciotoli G., Mazzini A. et al.* Sediment-hosted geothermal systems: Review and first global mapping // *Earth Science Review*. 2019. V. 192. P. 529–544. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.03.020>
- Reed M.H., Spycher N.F.* Calculation of pH and mineral equilibria in hydrothermal waters with application to geothermometry and studies of boiling and dilution // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1984. V. 48. P. 1479–1492.
- Schoell M.* Multiple origins of methane in the Earth // *Chemical Geology*. 1988. V. 71. P. 1–10.
- Shvartsev S.L.* Brines in the Siberian Platform: Geochemical and isotopic evidence for water–rock interaction // *Water–Rock Interaction 1998*. Arehart, G.B., Hulston, J.R. (Eds.), *Proc. 9th Int. Symp. Water–Rock Interaction*, Balkema. P. 357–360.
- Taran Y.A.* Geochemistry of volcanic and hydrothermal fluids and volatile budget of the Kamchatka–Kuril subduction zone // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2009. V. 73. P. 1067–1109. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.11.020>
- Taran Y.A., Giggenbach W.F.* Geochemistry of light hydrocarbons in volcanic and hydrothermal fluids // *Society of Economic Geologists. Special Publication*. 2003. V. 10. P. 61–74.
- Taran Y.A., Connor C.B., Shapar V.N. et al.* Fumarolic activity of Avachinsky and Koryaksky volcanoes, Kamchatka, from 1993 to 1994 // *Bulletin of Volcanology*. 1997. V. 58. P. 441–448.

МИНЕРАЛЬНЫЕ ВОДЫ АВАЧИНСКОЙ ДЕПРЕССИИ
MINERAL WATERS OF THE AVACHINSKY DEPRESSION, KAMCHATKA

Yu.A. Taran^{1,2}, G.V. Ryabinin³, B.G. Pokrovski⁴, I.N. Nazhalova⁵, N.A. Malik¹

¹*Institute of Volcanology and Seismology RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006;
e-mail: yuri.taran@gmail.com*

²*Institute of Geophysics, UNAM, Coyoacan 04510, Mexico City, Mexico*

³*Kamchatkan Branch of Geophysical Survey of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006*

⁴*Geological Institute RAS, Moscow, Russia, 119017*

⁵*Zarechny Company Lmd. Razdolny, Kamchatsky Kray, Russia, 684020*

Saline waters (up to 22 g/l) were tapped by deep (to 3000 m) wells at the foot of active volcanoes Avachinsky and Koryaksky, within Avachinsky depression. Temperature of waters was ~ 60°C in the western part and cold in the eastern part, closer to the Pacific coast. In this paper we present the literature and our own data on chemical and isotopic composition of these waters. The waters are of the Na-Cl type with extremely low abundances of sulfate and magnesium, high concentration of calcium and surprisingly high concentration of strontium. The waters contain about 50 ml/l of gas where methane and nitrogen are main components (~ 70 vol% and 30 vol%, respectively) and also presents H₂S (~ 30 ml/l) and very low concentrations of CO₂ (< 0.5 vol%). The N₂/Ar ratio, as a rule, is higher than the air ratio, i.e., the non-atmospheric nitrogen presents. We discuss the possible options of the water-rock interaction, responsible for the chemical composition of waters, and offer a conceptual model of the proposed basin of mineral waters that includes the distribution of deep temperatures, the location of the possible sources of heat mineralized solutions.

Keywords: Kamchatka, Avachinsky depression, thermo-mineral waters, isotope geochemistry, aquifers.

Поступила в редакцию 25.03.2021

После доработки 18.06.2021

Принята в печать 28.06.2021