



УДК 553.078.2 +553.21/.24

А. А. Нуждаев, С. Н. Рычагов

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
e-mail: envl@kscnet.ru, rychn@kscnet.ru*

Особенности поведения ртути в зоне гипергенеза Нижне-Кошелёвской геотермальной системы (Южная Камчатка)

На примере Нижне-Кошелёвской геотермальной системы, одной из наиболее крупных современных пародоминирующих гидротермальных систем Камчатки, выполнено обобщение данных о распределении ртути во всех типах сред, входящих в её структуру: горных породах, метасоматитах, гидротермальных глинах, почвенно-пирокластических отложениях, природных водах (термальных различного типа, смешанных, метеорных), паро-газовой фазе, солевых выпотах, концентратах рудных минералов (тяжёлой фракции донных осадков), др. На основе этих данных выделены проницаемые тектонические структуры, уточнены границы известной и новообразованной термоаномалий, показана высокая динамика преобразования исходных горных пород в гидротермальные глины, обсуждаются условия транспорта и концентрирования ртути в зоне гипергенеза геотермальной системы.

Введение

Несмотря на большое количество исследований в области геохимии ртути [1, 4, 9, 13, 14], в последние годы интерес к изучению её поведения в различных природных и техногенных системах не ослабевает [2, 5]. Это, вероятно, связано, прежде всего, с высокой подвижностью Hg и её соединений при различных Р-Т и физико-химических параметрах геологической среды. Детальное изучение распределения ртути в современных гидротермальных системах Южной Камчатки и Курильских островов позволило обратить внимание на Hg как индикатор многих геологических (тектонических, геотермальных и рудообразующих) процессов [10–12]. Целью настоящей работы является исследование динамики и механизмов различных геологических процессов, протекающих в структуре Нижне-Кошелёвской геотермальной системы, на основе обобщения большого количества полученных авторами фактических данных о распределении ртути в породах, метасоматитах, гидротермальных глинах, природных водах, паро-газовых струях, рудных минералах и др. средах.

Фактический материал

Отбор образцов твёрдых отложений (пород, метасоматитов, гидротермальных глин, донных осадков, солевых выпотов, почвенно-пирокластических отложений) и пробоподготовка выполнена по стандартным методикам [12]. Аналитические исследования проведены, в основном, в ИГХ СО РАН, г. Иркутск (атомно-абсорбционный метод, аналитики Л. Д. Андрулайтис и О. С. Рязанцева), а также в ИВиС ДВО РАН (рентгенофлюоресцентный метод, д.г.-м.н. И. И. Степанов). Отбор и консервирование

водных проб и паро-газовой фазы выполнены согласно методике, разработанной в ИГХ СО Л. Д. РАН Андрулайтис (аналитические работы, соответственно, проведены там же).

Ртуть в почвенно-пирокластических отложениях. Опробование этих отложений и определение в них концентраций ртути широко используется для выделения литогеохимических ореолов рассеяния над скрытыми залежами рудных полезных ископаемых, картирования сейсмоактивных разломов, обнаружения тектонически ослабленных зон, проницаемых для парогидротерм [14, 15]. С целью выделения таких структур в районе Нижне-Кошелёвской геотермальной системы был пройден геохимический профиль в направлении Ю-С длиной более 3 км, пересекающий все выделяемые ранее геолого-гидрогеологические структуры. Шаг опробования составил 100 м, на площади термоаномалий – 10 м. Отбирался наиболее тонкообломочный материал (супесь, суглинок) из подпочвенного горизонта. Концентрации ртути колеблются в широком диапазоне: от 0,029 мг/кг до 11,5 мг/кг. Аномально высокими значениями выделяются (рис. 1, с Ю на С): 1) Нижне-Кошелёвское Новое термальное поле, 2) Нижне-Кошелёвская основная т/а, 3) разломная зона, пересекающая Аргиллизитовую структуру и подтверждаемая другими геолого-геофизическими данными [8]. Небольшая ртутнометрическая аномалия на северной границе основной т/а, вероятно, обусловлена скрытой разгрузкой гидротерм, что подтверждается увеличением на этом участке температуры грунтов.

Площадная ртутнометрическая съёмка выполнена в районе новообразованной т/а, названной Нижне-Кошелёвским Новым термальным полем [7].

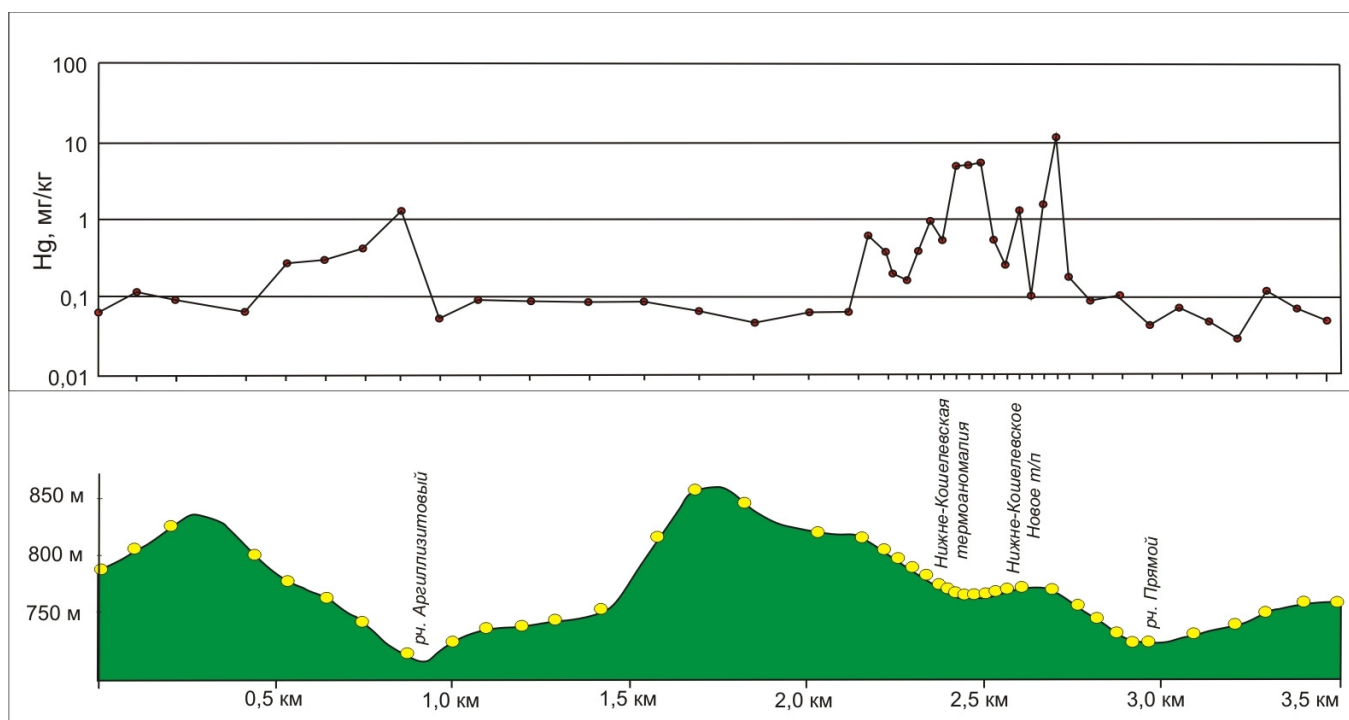


Рис. 1. Распределение ртути в подпочвенном горизонте по профилю, пересекающему Нижне-Кошелёвскую геотермальную систему.

Средние значения концентрации ртути в подпочвенном горизонте для разных температурных интервалов.

Год	Кол-во проб	Температура, °С			
		меньше 15	15–20	20–25	больше 25
Концентрация Hg, мг/кг					
2010	50	0,31	0,75	0,20	3,75
2011	152	0,26	0,40	0,47	5,16
2012	60	0,35	0,75	1,85	7,91
2013	147	0,34	0,94	2,88	5,62

Съёмка проводилась ежегодно с 2010 по 2013 гг., наиболее полно в 2011 и 2013 гг. по квадратной сети (см. таблицу). Концентрации ртути в подпочвенном горизонте достигали десятков мг/кг. Распределение содержаний Hg хорошо коррелируется с температурным полем. Более того, достаточно чётко выделяются зоны относительно высоких концентраций ртути, соответствующие температурной зональности (см. таблицу). В целом, обращает на себя внимание отчетливая корреляция температурного и ртутнометрического полей: совпадение аномалий наиболее высоких значений и границ полей, изменение пространственного положения и границ выделенных зон в результате остывания площади Нижне-Кошелёвского Нового термального поля в 2010–13 гг. после его внезапного разогрева в 2008–2009 гг. Такая корреляция свидетельствует о едином источнике и механизме образования (изменения) температурных и ртутнометрических аномалий — вследствие поступления паро-газовой

смеси и ртути в её составе, по-видимому, из области перегретого пара основной т/а [3].

2. Ртуть в породах. Изучение распределения Hg в различных по характеру и степени изменения горных породах обычно направлено на выяснение условий миграции ртути в земной коре, определение её источников, механизмов концентрирования (перераспределения), решения других вопросов. В районе Нижне-Кошелёвской геотермальной системы опробовались неизменённые породы (андезибазальты — андезидациты Западно-Кошелёвского вулкана), гидротермально изменённые до вторичных кварцитов и опалитов, преобразованные в различной степени (как правило, аргиллизированные) образцы пород из толщи гидротермальных глин (рис. 2). Наибольшими концентрациями Hg выделяются вторичные кварциты и опалиты, минимальными (на уровне фоновых значений для вулканогенных пород Курило-Камчатского регио-

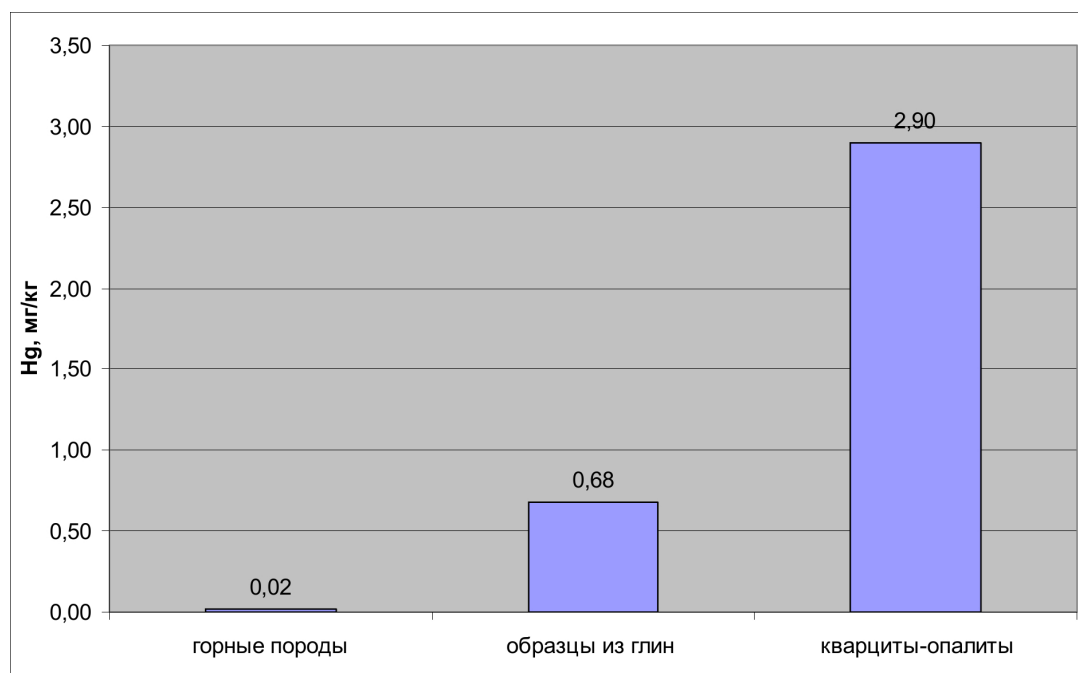


Рис. 2. Диаграмма распределения ртути в различных типах пород Нижне-Кошелёвской геотермальной системы.

на [6]) — лавы, экструзивные и интрузивные породы. Таким образом, гидротермально-метасоматические изменения, в целом, приводят к накоплению Hg в горных породах, что подтверждает общую концепцию об активном транспорте ртути в современных высокотемпературных газо-гидротермальных системах.

3. Ртуть в гидротермальных глинах. Ранее опробование гидротермальных глин на определение содержания Hg проводилось лишь для оценки общих условий поведения ртути в гидротермальном процессе [9, 14]. Систематическое послойное опробование толщи гидротермальных глин Нижне-Кошелёвской т/а на участках, отличающихся физико-химическими режимами разгрузки парогидротерм, показало следующее. Глины, в целом, характеризуются высокими, до ураганных, концентрациями Hg: от 0,1–0,5 до 10–20 мг/кг, а в отдельных случаях — до 50 мг/кг и выше. При этом в большинстве разрезов (изучено около 40 разрезов с помощью шурфов и скважин колонкового бурения) наибольшие концентрации ртути отмечаются в верхних слоях (рис. 3а). Но в отличие от термальных полей Паужетской гидротермальной системы распределение ртути в глинах Нижне-Кошелёвской т/а крайне неоднородно от разреза к разрезу: выделяются блоки с общим высоким содержанием Hg во всех слоях (рис. 3б), блоки с тенденцией увеличения концентраций к подошве толщи при высоком содержании Hg в приповерхностном слое (рис. 3в), и др. (рис. 3г). Таким образом, превышение уровня концентраций ртути в гидротермальных глинах активной высокотемпературной т/а, по сравнению с породами и аргиллизитами палеогидротермальной системы (опробовалась рядом расположенная Ар-

гиллизитовая структура), достигает 3–4-х порядков. Очевидно, что гидротермальные глины Нижне-Кошелёвской геотермальной системы обладают высокой сорбционной емкостью на ртуть. Показательно распределение Hg в разрезах делювиальных отложений на площади Нижне-Кошелёвского Нового термального поля. Центральная, наиболее прогретая, часть характеризуется высокими концентрациями Hg (1,0–7,0 мг/кг) по всему разрезу и (или) с некоторым повышением значений в приповерхностных горизонтах. Тонкообломочные отложения в этих разрезах подвержены интенсивной аргиллизации вследствие прогрева участка паро-газовой смеси. Отмечается корреляция высоких концентраций ртути с наиболее аргиллизированными слоями. На границе новообразованного термального поля содержания ртути в разрезах на порядок ниже и отмечается тенденция постепенного роста концентраций Hg к нижним горизонтам — параллельно с ростом степени аргиллизации тонкообломочного материала. Таким образом, концентрирование ртути в делювиальных отложениях Нижне-Кошелёвского Нового термального поля коррелируется с преобразованием пород в гидротермальные глины, эти процессы взаимосвязаны и носят высокодинамичный характер (протекают в течение нескольких лет).

4. Ртуть в природных водах. На площади Нижне-Кошелёвской геотермальной системы были опробованы все типы формирующихся здесь природных вод: 1) термальные прозрачные газонасыщенные (пульсирующие); 2) растворы в грязе-водных котлах, часто также кипящие; 3) смешанные воды рч. Гремучий; 4) разгрузки глубинных нейтральных до субщелочных гидротерм (источники среднего течения рч. Прямой), 5) холодные воды ручьёв;

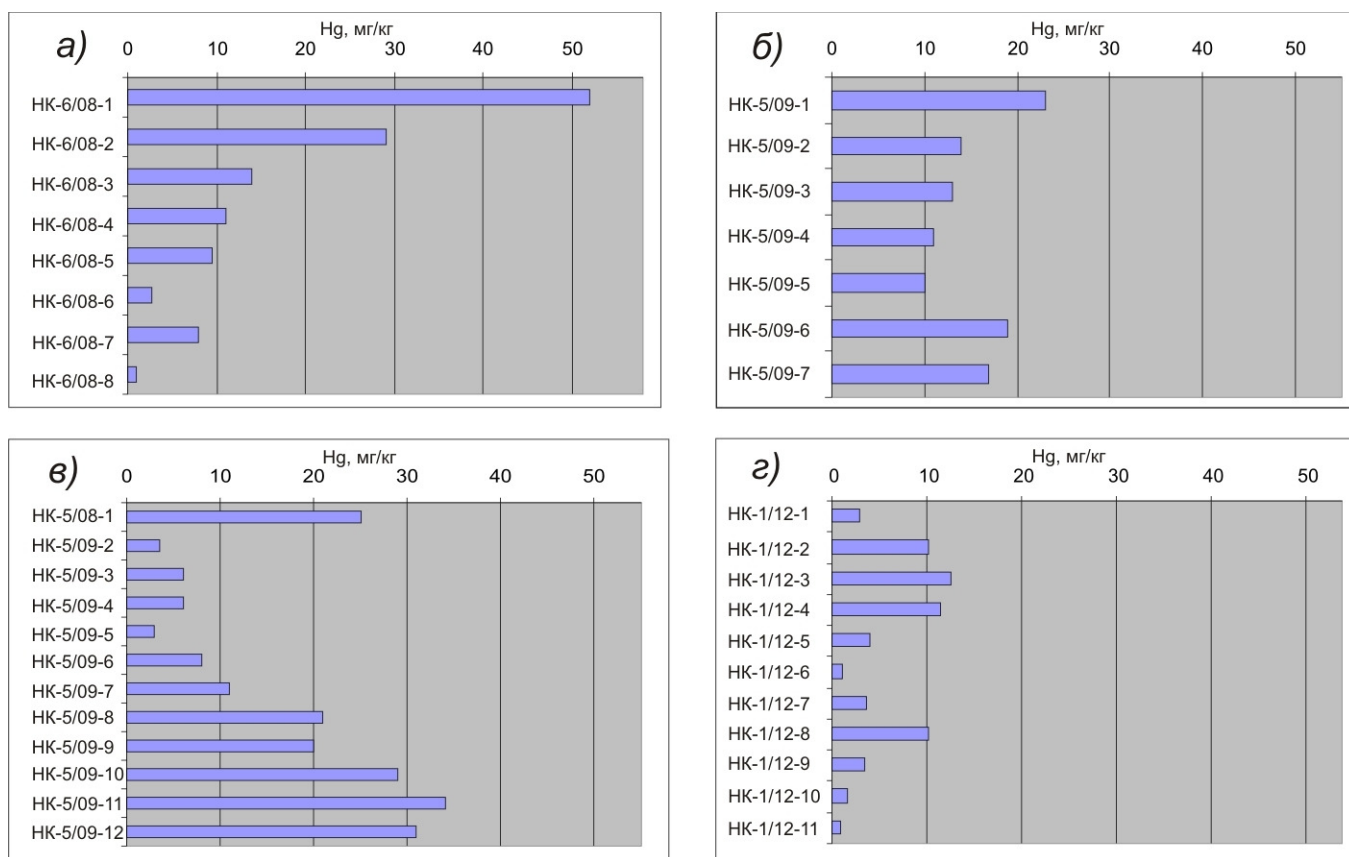


Рис. 3. Диаграммы наиболее характерного распределения ртути в разрезах гидротермальных глин Нижне-Кошелёвской т/а.

б) воды из-под снежников (рис. 4). Максимально высокими значениями выделяется первый тип вод (до 3,5 мкг/л), минимальными — воды, вытекающие из-под снежников (не более 0,01 мкг/л). Последние были отобраны на удалении во многие километры от Нижне-Кошелёвской т/а и могут считаться фоновыми. Высокими значениями концентраций ртути (до 1,1 мкг/л), но существенно ниже термальных прозрачных, выделяются растворы грязе-водных котлов, насыщенные тонкой взвесью глинистых минералов, а также частицами самородной серы и сульфидов железа. Вероятно, в этих котлах часть ртути высаживается из раствора на поверхность глинистых и др. частиц. Промежуточными значениями концентраций Hg выделяются другие типы вод (см. рис. 4), что, по-видимому, отражает характер смещения термальных вод и разбавления их метеорными. В целом, заметна тенденция роста концентраций Hg при повышении температуры воды. Необходимо также отметить, что аномально высокие содержания Hg в термальных водах Нижне-Кошелёвской геотермальной системы соответствуют таковым в ряде современных гидротермальных систем мира: Гейзерс (США), Монтэ-Амиата (Италия), Мутновской (Россия).

5. Ртуть в паро-газовой фазе. На площади Нижне-Кошелёвской т/а опробовались практически все относительно сухие и физически доступные па-

ро-газовые струи, за два года исследований получены устойчивые результаты (рис. 5). Максимальные содержания ртути составляют 0,05 мкг/л, что сопоставимо с концентрациями Hg в паро-газовой фазе участка Дачный Мутновского геотермального месторождения [14]. В пределах Нижне-Кошелёвской т/а более высокие значения Hg в паро-газовых струях характерны для Верхнего и Западного участков. БСВ и Центральная часть характеризуются другим гидрогеологическим режимом (существенно более обводнены) и интенсивными эрозионными процессами (что также во многом связано с обилием метеорных и смешанных вод в этой части т/а). Таким образом, паро-газовая фаза Верхнего и Западного участков более сухая, что, вероятнее всего и определяет повышение здесь уровня концентраций Hg: согласно общепринятым взглядам [14], при вскипании гидротерм ртуть переходит из жидкой в газовую фазу и таким образом происходит обогащение паро-газовой смеси.

6. Ртуть в поровых растворах гидротермальных глин. С целью изучения поведения ртути в поровых растворах, играющих большую роль в процессах формирования состава и свойств гидротермальных глин, были подготовлены водные вытяжки по методике, разработанной в АЦ ИВиС ДВО РАН Е. В. Карташёвой. При подготовке водных вытяжек в состав анализируемого раствора могут попадать

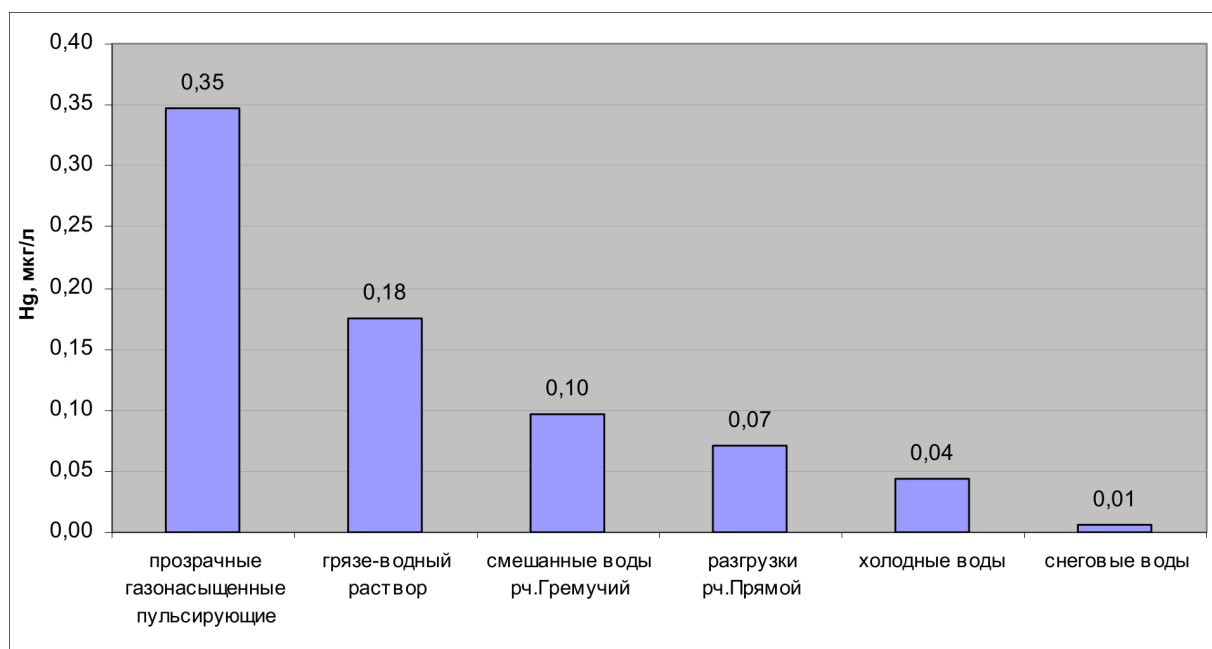


Рис. 4. Диаграмма распределения ртути в различных типах природных вод Нижне-Кошелевской геотермальной системы.

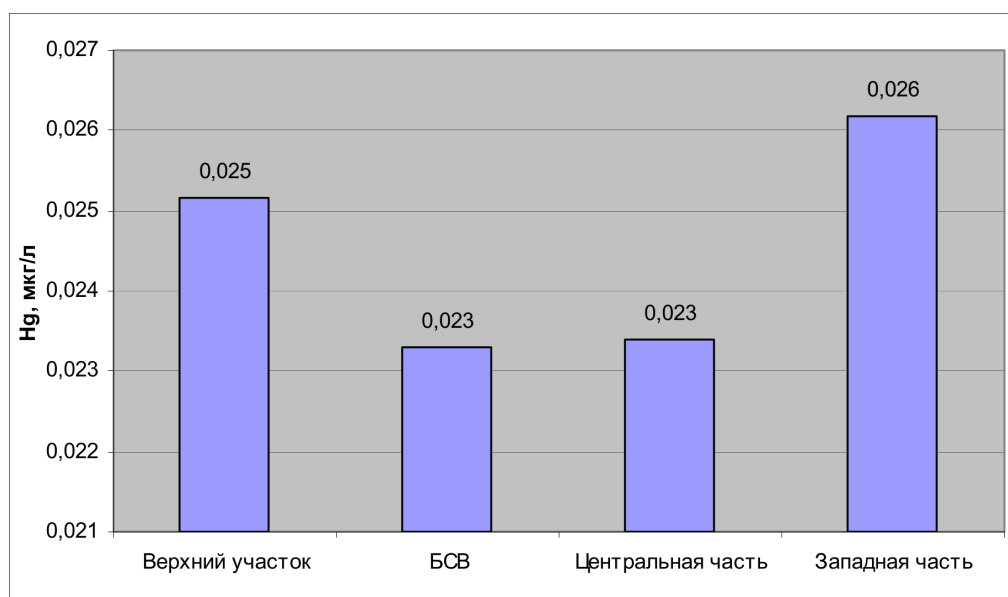


Рис. 5. Диаграмма распределения Hg в паро-газовой фазе по участкам в пределах Нижне-Кошелевской т/а.

легко растворимые соли, содержащиеся в глинах. Но наш взгляд, во-первых, роль этих солей не столь велика, а во-вторых, сами соли образуются, в основном, за счёт испарения поровых вод, т. е. отражают их состав. Поэтому условимся называть воды, извлеченные из гидротермальных глин с помощью подготовки водных вытяжек, поровыми растворами. Поровые растворы гидротермальных глин основной т/а характеризуются аномально высокими значениями Hg — от первых единиц до 20–30 мкг/л, а в отдельных слоях толщи глин — 50–60 мкг/л, что на порядок превышает максимальные содержания Hg в горячих газонасыщенных термаль-

ных водах. Обращают на себя внимание ураганные концентрации ртути в поровых растворах аргиллизированных делювиальных отложений центральной части Нижне-Кошелевского Нового термального поля (максимальные 250–270 мкг/л при средних 120 мкг/л). В краевой части поля содержания Hg в поровых растворах находятся на среднем высоком уровне (10–20 мкг/л, а в отдельных слоях, сложенных наиболее аргиллизированными суглинками, до 60 мкг/л), что сравнимо с распределением ртути в поровых растворах основной т/а (рис. 6). Эти данные свидетельствуют об активном привносе ртути паро-газовой фазой в процессе прогрета и аргилли-

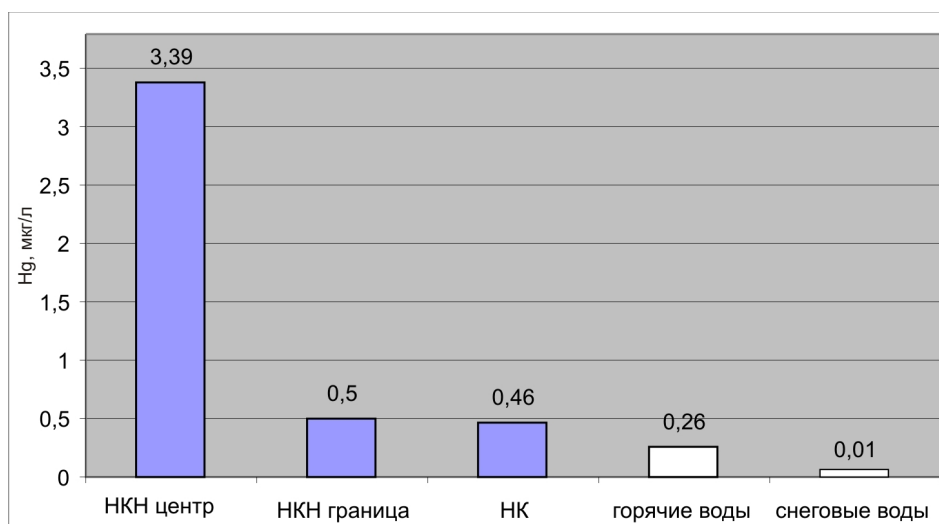


Рис. 6. Диаграмма распределения ртути в поровых растворах гидротермальных глин Нижне-Кошелёвской геотермальной системы.

зации тонкообломочных делювиальных отложений. Таким образом, ртуть в поровых растворах служит своеобразным индикатором начального этапа интенсивной аргиллизации пород под воздействием восходящего паро-газового теплоносителя.

Заключение

Нижне-Кошелёвская геотермальная система характеризуется высокими значениями содержания ртути во всех типах гидротермально-метасоматических новообразований, термальных водах, паро-газовой фазе, тяжёлой (рудной) минеральной фракции. Это ставит её в один ряд с некоторыми крупными современными гидротермальными системами (Гейзерс, Монтэ-Амиата, Мутновская) и даёт определённые возможности для решения фундаментальных научных и практических задач. В частности, на основе детального изучения распределения ртути выделены геологические структуры, сохраняющие в верхнечетвертичное время тектоническую активность (разлом рч. Аргиллизитовый), намечены границы области основной разгрузки парогидротерм (приповерхностные границы зоны гипергенеза основной термоаномалии), показана динамика температурного и геохимического полей Нижне-Кошелёвского Нового термального поля в режиме реального времени, получены новые данные об условиях миграции и накопления Hg при аргиллизации пород, установлен факт (довольно редкий для современных гидротермальных систем) образования сульфидов ртути в гидротермальных глинах. Таким образом, ртуть служит индикатором многих геологических (физико-химических) процессов, играющих важную роль в формировании и изменении Нижне-Кошелёвской (и, по-видимому, других) геотермальных систем.

Авторы глубоко признательны всем коллегам по экспедиции за помощь в организации и проведении полевых работ и сотрудникам Аналитических

Центров ИГХ СО РАН и ИВиС ДВО РАН за большой объём аналитических исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №№ 14-05-31158мол_а, 14-05-31263мол_а) и Дальневосточного отделения РАН.

Список литературы

1. Айдиньян Н.Х., Озерова Н.А., Волкова А.В., Шикина Г.П. К вопросу о летучести ртути и её соединений // Геохимия. 1969. №9. С. 251-260.
2. Астахов А.С., Валлманн К., Иванов М.В. и др. Распределение ртути и скорость её накопления в верхнечетвертичных отложениях котловины Дерюгина Охотского моря // Геохимия. 2007. №1. С. 54-70.
3. Денисов Д.К., Нурдаев И.А., Феофилактов С.О. Изучение геологического строения Паужетского и Нижне-Кошелёвского геотермальных месторождений методом ВЭЗ (Южная Камчатка) // Материалы XI региональной молодёжной научной конференции «Исследования в области наук о Земле». Петропавловск-Камчатский. 2013. С. 77-97.
4. Жеребцов Ю.Д. Термоформы нахождения ртути в литохимических ореолах золото-серебряных месторождений и их поисковое значение // Геохимия. 1991. №1. С. 75-87.
5. Коваль П.В., Калмычков Г.В., Лавров С.М. и др. Антропогенная компонента и баланс ртути в экосистеме Братского водохранилища // ДАН. 2003. Том. 388. №2. С. 225-227.
6. Леонова Л.Л. Геохимия четвертичных и современных вулканических пород Курильских островов и Камчатки // Геохимия. 1979. №2. С. 179-197.
7. Нурдаев А.А., Чернов М.С., Феофилактов С.О., Нурдаев И.А. Нижне-Кошелёвское Новое термальное поле: история появления и развитие // Материалы XI региональной молодёжной научной конференции «Исследования в области наук о Земле». Петропавловск-Камчатский. 2013. С. 111-124.

8. *Нуждаев И. А., Феофилактов С. О.* Современное состояние изученности строения Центральной части Нижне-Кошелёвского геотермального месторождения (Южная Камчатка) и результаты магнитной съёмки // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле.* 2013. № 2 (22). С. 231–241.
9. *Озерова Н. А.* Ртуть и эндогенное рудообразование. М.: Наука, 1986. 232 с.
10. *Рычагов С. Н., Нуждаев А. А., Степанов И. И.* Поведение ртути в зоне гипергенеза геотермальных месторождений (Южная Камчатка) // *Геохимия.* 2009. № 5. С. 533–542.
11. *Рычагов С. Н., Нуждаев А. А., Степанов И. И.* Ртуть как индикатор современной рудообразующей газо-гидротермальной системы (Камчатка) // *Геохимия.* 2014. № 2. С. 145–157.
12. *Рычагов С. Н., Степанов И. И.* Гидротермальная система вулкана Баранского, о-в Итуруп: особенности поведения ртути в недрах // *Вулканология и сейсмология.* 1994. № 2. С. 41–52.
13. *Сауков А. А., Айдиньян Н. Х., Озерова Н. А.* Очерки геохимии ртути. М.: Наука, 1972. 336 с.
14. *Трухин Ю. П., Степанов И. И., Шувалов Р. А.* Ртуть в современном гидротермальном процессе. М.: Наука, 1986. 199 с.
15. *Фурсов В. Э.* Ртуть — индикатор при геохимических поисках рудных месторождений. М.: Недра, 1977. 144 с.