

РТУТЬ КАК ИНДИКАТОР ТЕМПЕРАТУРНЫХ И ГЕОХИМИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ В СОВРЕМЕННЫХ РУДООБРАЗУЮЩИХ ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

А.А. Нуждаев¹, С.Н. Рычагов¹, И.И. Степанов²

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,
e-mail: envi@kscnet.ru

² ОАО «Александровская опытно-методическая экспедиция»,
e-mail: stepanovvi@mail.ru

В последние годы интерес к поведению ртути в геологической среде не только не ослабевает, но значительно вырос в связи с широким распространением этого элемента в лито-, гидро- и атмосфере и обнаруженным новым особенностям миграции Hg, в первую очередь, в геодинамически активных регионах земного шара. Так, показана связь аномальных вариаций содержания ртути в воде зон активных разломов с современной сейсмической активностью Байкальской рифтовой структуры [Коваль и др., 2003]. Литохимические ореолы рассеяния ртути в морских четвертичных отложениях, локализующиеся вдоль флюидопроводящих разрывных нарушений, используются при выявлении и картировании источников углеводородного сырья [Астахов и др., 2007]. Изучение поведения ртути на геотермальных месторождениях традиционно связано с решением задач поискового характера: обнаружением и трассированием зон, проницаемых для гидротермального флюида, выделением скрытых термоаномалий и т.п. [Трухин и др., 1986]. При этом считается, что практически вся ртуть из вмещающих пород под воздействием аномально высокого конвективного теплового потока отгоняется из недр месторождений и накапливается в приповерхностных аргиллизированных отложениях. Нами было показано, что на прогрессивном этапе развития гидротермально-магматической системы ртуть может создавать аномально высокие концентрации в трещинно-брекчиевых зонах по всему геологическому разрезу, а по мере эволюции системы основная масса ртути транспортируется к дневной поверхности [Рычагов, Степанов, 1994]. Одновременно происходит локализация зон миграции ртути в центральных частях систем и месторождений и потеря связи ее потока с глубинными (вероятно, магматическими) источниками. Такое поведение ртути в геотермальных условиях, а также корреляция ее распределения с золотом, полиметаллами и др. элементами позволяет использовать Hg не только как фактор оценки структуры проницаемости и изменения температуры среды, но и как возможный индикатор механизмов формирования рудных геохимических барьеров в гидротермально-магматических системах.

Отбор образцов, подготовка проб и аналитические исследования выполнены по стандартной методике [Рычагов, Степанов, 1994] на примере наиболее известных геотермальных месторождений Южной Камчатки – Мутновского, Паужетского, Паратунского и Нижне-Кошелевского, и термальных полей Камбального вулканического хребта (рис. 1). «Фоновый» участок выбран на фланге Паратунского геотермального месторождения, где в этой части данной геологической структуры не отмечается проявлений аномального теплового потока. Изучены горные породы в первичном залегании, гидротермально измененные породы, аргиллизиты (гидротермальные глины), образующиеся в гидротермальных глинах сульфиды железа (пирит), почвенно-пирокластические отложения, кремнистые осадки и травертины, солевые выпоты и донные отложения.

Изучение распределения содержаний ртути в опорных разрезах (скважинах) геотермального месторождения Океанское, расположенного на склоне действующего вулкана Баранского (о-в Итуруп) показало, что Hg создает аномалии повышенных концентраций не только в приповерхностных зонах, но и на различных глубинах [Рычагов, Степанов, 1994]. Породы, в целом, обогащены ртутью – на порядок выше фоновых значений [Леонова, 1979] для региона. Вместе с тем, распределение Hg неоднородно от разреза к разрезу. В относительно опущенных блоках, по которым происходит охлаждение пород вследствие инфильтрации метеорных и смешанных термальных вод на глубину, наблюдается чередование участков с низкими и высокими концентрациями Hg (рис. 2а).

Аномально высокие содержания ртути коррелируются с зонами повышенной трещиноватости и пористости пород, участками разуплотнения на границах литологических

горизонтов, зонами сульфидизации. Отмечается также накопление Hg в рыхлых обломочных породах, находящихся под и между потоками лав или силлами андезитов. Лавовые потоки и субгоризонтально залегающие силлы и дайки, отличающиеся слабой проницаемостью для парогидротерм и газов, по-видимому, служат экранами для флюида, насыщенного парами ртути.

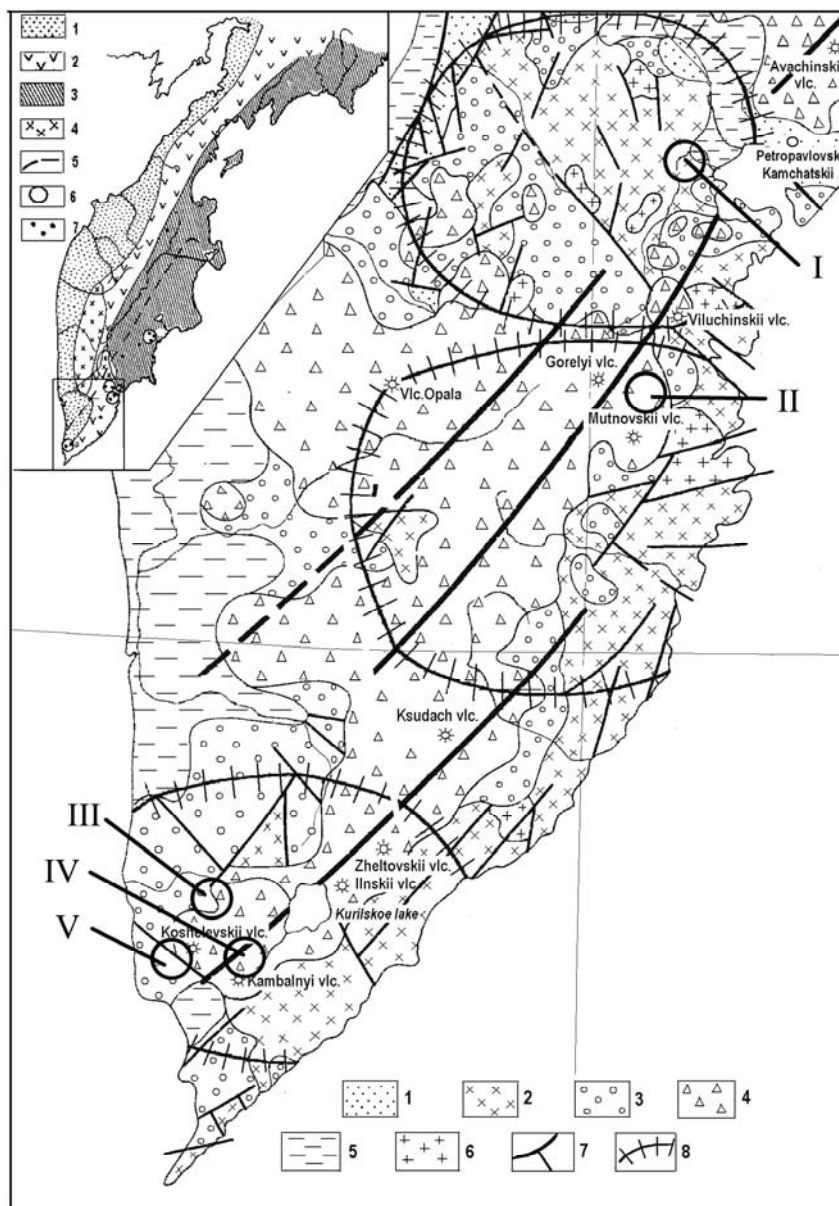


Рис. 1. Геотермальные районы Южной Камчатки, структурная схема (по [Rychagov et al., 2006]). На врезке: основные структурные зоны Камчатки в палеоген-неогеновое время (составлена Г.М. Власовым и В.В. Ярмолюком в 1964 г.): 1 – Западно-Камчатская, 2 – Центрально-Камчатская, 3 – Восточно-Камчатская зоны; 4 – Срединный массив; 5 – граница Восточно-Камчатской вулканической зоны; 6 – геотермальные районы; 7 – геотермальные системы. На основном рисунке [Геолого-геофизический..., 1987]: 1 – доостроводужные породы (доолигоценовые); 2 – нижний структурный ярус (олигоцен (?) – средний миоцен); 3 – средний ярус (средний миоцен – плиоцен); 4 – верхний ярус – четвертичные вулканы и плиоцен-четвертичные (?) осадочные толщи верхнего структурного яруса внутренней зоны островной дуги; 6 – крупные тела формации кварцевых диоритов; 7 – разломы; 8 – границы геотермальных районов, с севера на юг: Паратунского, Мутновско-Жировского и Паужетско-Камбалньо-Кошелёвского. Цифрами обозначены геотермальные месторождения: I – Паратунское, II – Мутновское, III – Паужетское, V – Нижне-Кошелёвское; и термопроявления Камбалнього хребта (IV).

С другой стороны, в зонах перехода жидкость-пар концентрации ртути обычно не выше фоновых. Вероятно, в условиях термодинамических барьеров зон кипения ртуть легко мигрирует по разрезу. В приподнятых блоках пород (рис. 2б) разрезы фактически стерильны,

отмечаются лишь отдельные мелкие аномалии концентраций Hg. Высокая температура пород в таких блоках (до 380-470⁰С на глубине 800-1000 м), контролирующая потоки восходящего высокотемпературного флюида, обеспечивает миграцию ртути из трещинно-порового пространства и кристаллической решетки минералов к дневной поверхности. Таким образом, в структуре гидротермально-магматической системы Баранского, находящейся на этапе прогрессивного развития, ртуть служит индикатором зон повышенной проницаемости, температурных условий и, по-видимому, рудных геохимических барьеров, в т.ч. на глубине более 500-1000 м.

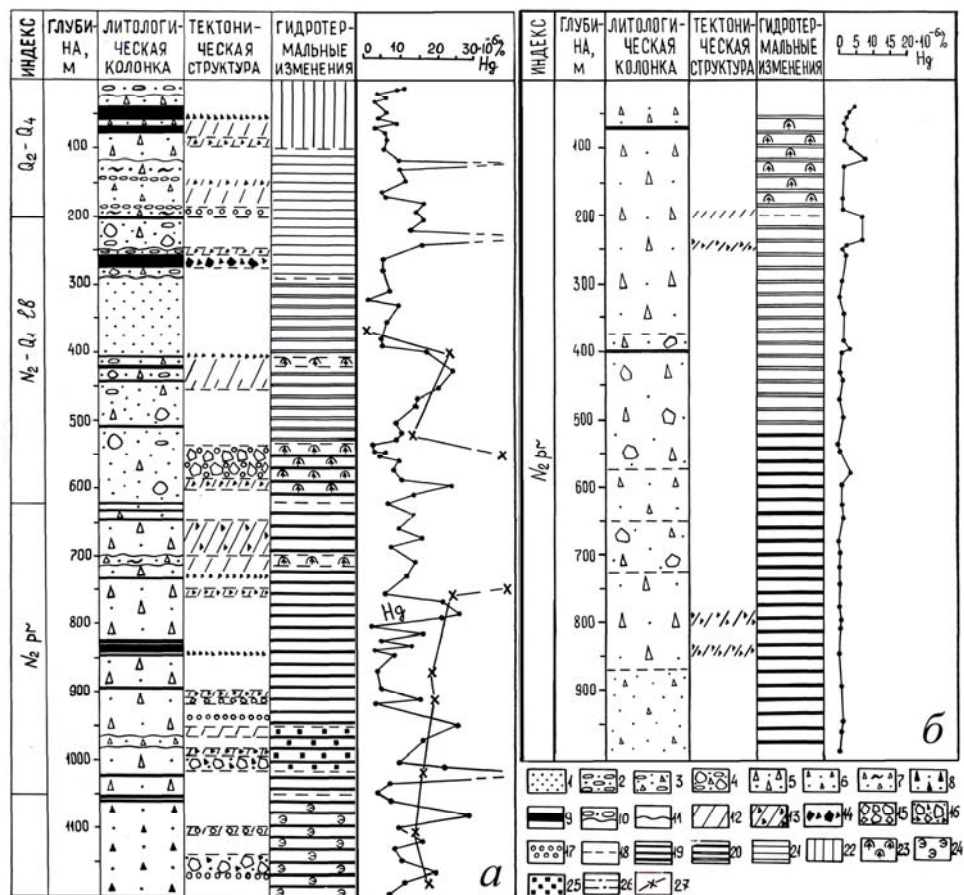


Рис. 2. Геологические разрезы системы Баранского [Рычагов, Степанов, 1994], *а* – опущенный блок (св. 54), *б* – приподнятый блок (св. 65). 1 – туффи́ты; 2 – галечники; 3 – туфогалечники; 4 – туфоконгломераты; 5 – туфы псефитовые андезидацитового состава; 6 – то же, псаммитовые; 7 – игнимбриты и пемзовые туфы; 8 – интрузивные брекчии; 9 – эффузивы, дайки и силы андезибазальтового состава; 10 – делювий; 11 – стратиграфические границы; 12 – зоны трещиноватости; 13 – тектонические брекчии; 14 – приконтактные брекчии; 15 – гидротермальные брекчии; 16 – полимиктовые комбинированные брекчии; 17 – участки повышенной пористости пород; 18 – границы тектонических зон и фаций метасоматитов; 19 – среднетемпературные, 20 – низко-среднетемпературные, 21 – низкотемпературные пропилиты; 22 – породы зон сернокислотного выщелачивания; 23 – гидротермалиты зон кипения; 24 – повышенное содержание эпидота; 25 – то же, сульфидов; 26 – границы геохимических аномалий; 27 – содержание ртути в монофракциях пирита.

Исследование распределения ртути в зоне гипергенеза геотермальных месторождений Ю. Камчатки показало, что поведение этого химического элемента неоднозначно и зависит от температурных и физико-химических условий формирования и преобразования различных геологических отложений. Залегающие на дневной поверхности горные породы, в целом, содержат низкие, фоновые для Курило-Камчатского региона [Леонова, 1979], значения концентраций Hg. При этом Мутновское геотермальное месторождение отличается высокими средними значениями концентраций Hg в разнообразных по происхождению неизмененных породах (лавах, туфах, игнимбритах, брекчиях), а также в других твердых отложениях – метасоматитах, почвах, глинах и др. (рис. 3). По нашему мнению это объясняется, прежде всего, отличием Мутновского месторождения и одноименной гидротермально-магматической системы от др. изученных объектов по ряду общих параметров: повышенной установленной и

прогнозной мощностью (62 и более 300 МВт_г, соответственно), длительным характером (в течение всего четвертичного периода) гидротермально-метасоматической переработки огромного массива пород ($\geq n \times 100 \text{ км}^3$), широким проявлением на дневной поверхности толщи аргиллизитов ($\geq n \times 10 \text{ км}^2$), наличием в недрах гидротермально-магматической системы крупного и длительноживущего источника теплового и рудного питания. Гидротермально измененные породы, а также развитые в пределах всей зоны гипергенеза почвенно-пирокластические отложения содержат ртуть в концентрациях на 1-2 порядка выше фоновых значений. Это же характерно и для донных осадков, изученных детально на двух геотермальных месторождениях – Паужетском и Мутновском. Накопление ртути в указанных образованиях связано с современным гидротермальным процессом и наличием в метасоматитах, почвах и донных осадках породообразующих и вторичных минералов, концентрирующих ртуть. Отчасти на вопросы об условиях и механизмах накопления и перераспределения ртути при различных параметрах геотермальной среды могут ответить результаты изучения толщи гидротермальных глин и искусственных кремнистых отложений.

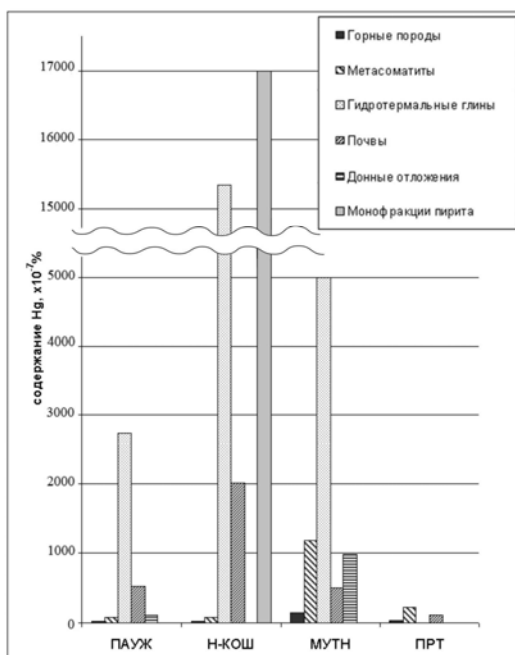


Рис. 3. Содержание Hg в различных типах твердых отложений.

Ранее было показано, что высокий уровень содержания ртути в гидротермальных глинах обусловлен, главным образом, накоплением ее в глинистых минералах на температурном барьере [Степанов и др., 1982]. Наряду с этим, активным концентратором ртути в гидротермальных зонах выступает пирит. Этот тезис находит подтверждение на примере изучения разрезов гидротермальных глин Нижне-Кошелевской термоаномалии и Верхне-Паужетского геотермального поля. На последнем высокие концентрации Hg в глинах связаны с приповерхностным горизонтом «синих глин» (до $\geq 2 \times 10^{-4}\%$), в которых количество пирита составляет $\geq 90\%$ от объема. При этом, мономинеральные пробы пирита показывают значения концентраций Hg на 1-2 порядка выше. Гидротермальные глины в разрезах Нижне-

Кошелевской термоаномалии характеризуются, в целом, высоким содержанием и относительно равномерным распределением пирита в слоях (до 30-40 объемных %); концентрации Hg в валовых пробах глин достигают $n \times 10^{-3}\%$, монофракциях пирита – $n \times 10^{-2}\%$. Таким образом, пирит является хорошим концентратором ртути, а также золота, полиметаллов и др. элементов, что было показано не только для эпитептермальных рудных месторождений, но и для современных Геотермальных условий [Структура..., 1993].

Кремнистые осадки Паужетского геотермального месторождения содержат ртуть, в среднем, на уровне $(1-3) \times 10^{-6}\%$, что отвечает фоновым значениям для твердых отложений в условиях гидротермального процесса. Высокими концентрациями Hg (на порядок выше фоновых значений) могут отличаться кремнистые осадки, образующиеся непосредственно на излияе термальной воды из скважин. Существует также тенденция снижения концентраций ртути от верхнего слоя осадков к нижнему и от начала формирования «плаща» вниз по его простираению. Приведенные данные свидетельствуют в пользу поступления ртути из глубинного гидротермального потока (эксплуатируемый водоносный горизонт на данном участке Паужетского месторождения расположен, в среднем, в интервале глубин 600-800 м) и концентрированию ее совместно с коллоидной кремнекислотой на первом термодинамическом барьере - у устья скважин. Вероятно, силикагель, наряду с растительным субстратом, служит хорошим сорбентом ртути. При старении силикагеля и образовании минералов кремнезема ртуть, находящаяся здесь в атомарной форме, может достаточно легко высвободиться из решетки или дефектной структуры минералов и мигрировать к основанию разреза и вдоль по потоку.

Высокий уровень концентраций Hg в почвах на центральных участках геотермальных месторождений обусловлен следующими причинами: 1) интенсивной эманацией ртути из вмещающих пород (глубинного источника?) под воздействием аномально высоких температур восходящего теплового потока, установленного для Нижне-Кошелевского и Мутновского месторождений, и накоплением ее в породах вблизи дневной поверхности на температурном барьере; 2) образованием термодинамического и геохимического барьера в основании почвенного разреза, в частности, за счет выпадения здесь ряда солей (сульфатов, скрытокристаллического кремнезема из силикатного геля, и др.), которые могут выполнять роль сорбентов ртути. Хорошим сорбентом Hg также можно считать отложения торфа, погребенного под современными кремнистыми осадками, образующимися при сбросе термальной воды на поверхность Паужетского месторождения. На сорбционные свойства торфяника, вероятно, оказывают влияние высокая степень открытости системы «кремнистый осадок – растительный субстрат» за счет активной и постоянной циркуляции термальных вод, и интенсивное преобразование захороненной растительности в условиях повышенных температур среды.

Таким образом, получены данные об источниках, условиях миграции и механизмах концентрирования ртути в условиях геотермальных систем. Ртуть поступает на дневную поверхность в составе глубинного гидротермального потока и концентрируется на термодинамических барьерах в гидротермальных глинах, кремнистых осадках (силикагеле), травертинах (кальциевом геле); почвах, обладающих повышенной соленостью за счет отложения в них из пароводяной смеси кремнезема, сульфатов и др. соединений. Хорошими сорбентами ртути при атмосферном давлении и температурах от 20⁰С до 150⁰С являются новообразованные сульфиды железа (в частности, пирит), силикатный и кальциевый гели и торф, образующийся на поверхности месторождений вследствие захоронения растительности под кремнистыми осадками. Уровень концентрации ртути в твердых отложениях и характер ее распределения в зоне гипергенеза геотермальных месторождений – указывают на мощность и возможную глубину залегания источника тепла.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 09-05-00022а) и Президиума ДВО РАН (проекты 09-III-A-08-418, 09-III-B-08-469 и 09-III-D-08-492).

Список литературы

Астахов А.С., Валлманн К., Иванов М.В. и др. Распределение ртути и скорость ее накопления в верхнечетвертичных отложениях котловины Дерюгина Охотского моря // *Геохимия*, 2007. № 1. С. 54-70.

Геолого-геофизический атлас Курило-Камчатской островной системы / Под ред. Сергеева К.Ф., Красного М.Л. Л.: ВСЕГЕИ, 1987. 36 л.

Коваль П.В., Калмычков Г.В., Лавров С.М. и др. Антропогенная компонента и баланс ртути в экосистеме Братского водохранилища // *Доклады Академии Наук*. 2003. Т. 388. № 2. С. 225-227.

Леонова Л.Л. Геохимия четвертичных и современных вулканических пород Курильских островов и Камчатки // *Геохимия*, 1979. № 2. С. 179-197.

Жеребцов Ю.Д. Термоформы нахождения ртути в литохимических ореолах золото-серебряных месторождений и их поисковое значение // *Геохимия*, 1991. № 1. С. 75-87.

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.

Степанов И.И., Стахеев Ю.И., Сандомирский А.Я., Мясников И.Ф. Новые данные о формах нахождения ртути в горных породах и минералах // *Доклады АН СССР*, 1982. Т. 266. № 4. С. 1007-1011.

Структура гидротермальной системы. М.: Наука, 1993. 298 с.

Трухин Ю.П., Степанов И.И., Шувалов Р.А. Ртуть в современном гидротермальном процессе. М.: Наука, 1986. 199 с.

Rychagov S.N., Belousov V.I., Belousova S.P. Hierarchy System of Geothermal Structures, a New Outlook on Generation and Transport of Geothermal Energy in Modern Volcanism Areas // *Geothermal Resources – Securing Our Energy Future*, 2006. V. 30. P. 941-946.