

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТА РТУТИ В СОВРЕМЕННЫХ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ (ЮЖНАЯ КАМЧАТКА)

¹Рычагов С.Н., ¹Нуждаев А.А., ²Степанов И.И.

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

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

Исследование поведения ртути в природных системах остается одним из наиболее актуальных направлений фундаментальной науки. В областях современного и четвертичного вулканизма значительная часть ртути, поступающей к дневной поверхности, связана с островными дугами, как наиболее проницаемыми структурами земной коры, в пределах которых Hg создает положительные аномалии в гидротермальных системах [1–3]. На высокую подвижность соединений ртути в гидротермальном процессе обращал внимание еще А.А. Сауков с коллегами [4]. Гидротермальным системам посвящено много исследований, в т.ч. касающихся геохимии ртути [5–8]. Но вопросов не становится меньше, несмотря на общее понимание большой роли Hg как индикатора магматических, структурных, геодинамических, геотермальных, минералорудообразующих и др. процессов; ее влияния на биосферу и экологию регионов. Ключевую роль в расшифровке причин высокой подвижности ртути может иметь изучение ее поведения в гидротермальных системах [3, 8, 9]. В настоящем докладе представлена модель транспорта (геохимического цикла) ртути на примере гидротермальных систем Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального (рудного) района Южной Камчатки (рис. 1). Детальная характеристика объектов исследований (вулканических массивов, основных гидротермальных систем, эксплуатируемых и разведанных геотермальных месторождений, термоаномалий и термальных полей) приведена в [9, 10].

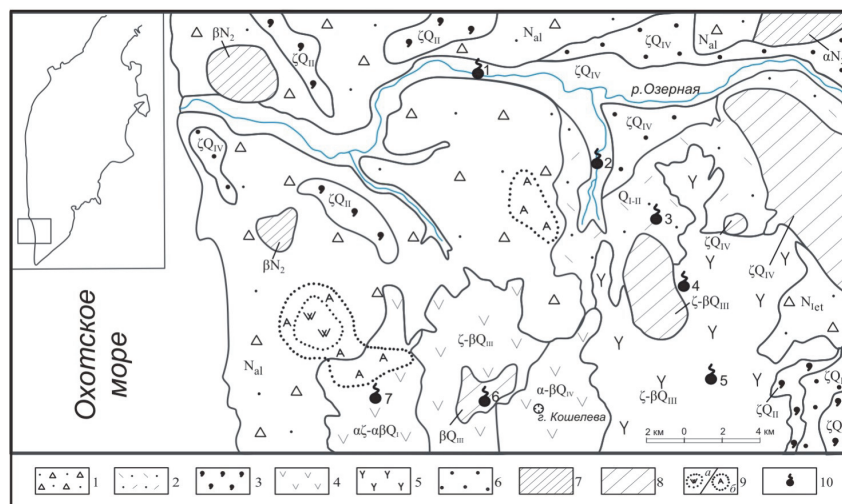


Рис. 1. Геологическая схема Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального (рудного) района, Южная Камчатка. 1 – лаво-пирокластические и вулканогенно-осадочные нерасчлененные отложения фундамента неогенового возраста; 2 – вулканогенно-осадочные отложения паужетской свиты; 3 – игнимбриты, дациты и риодациты среднечетвертичного возраста; 4 – лавовые комплексы Кошелевского вулканического массива; 5 – вулканициты Камбального хребта; 6 – пемзовые отложения дацитов верхнечетвертичного возраста; 7 – субвулканические и экструзивные тела базальтов и андезитов неогенового возраста; 8 – экструзивно-субвулканические тела средне- и верхнечетвертичного возраста от основного до кислого состава; 9 – поля гидротермально измененных пород: а – вторичных кварцитов, б – аргиллизитов; 10 – основные современные термоаномалии района: 1 – Первые Горячие Ключи, 2 – Вторые Горячие Ключи (Паужетское эксплуатируемое геотермальное месторождение), 3 – Северо-Камбальная, 4 – Центрально-Камбальная, 5 – Южно-Камбальная, 6 – Верхне-Кошелевская, 7 – Нижне-Кошелевская (одноименное разведанное геотермальное месторождение).

Методика исследований включала: 1) проведение полевых работ (изучение опорных геологических разрезов, отбор керн глубоких и картировочных скважин, проходку шурфов и скважин на термальных полях с послойным отбором материала, систематическое опробование солевых и др. твердых отложений; отбор всех типов природных вод, конденсата пара и поровых растворов), 2) пробоподготовку по стандартным методикам [3, 9] (консервирование водных проб и паро-газовой смеси выполнено согласно методике, разработанной Л.Д. Андрулайтис в ИГХ СО РАН), 3) аналитические исследования в ИВиС ДВО РАН (И.И. Степанов) и в ИГХ СО РАН (Л.Д. Андрулайтис и О.С. Рязанцева).

Фактические данные комплексных исследований свидетельствуют о том, что исходные горные породы (распространенные за пределами гидротермальных систем) характеризуются самым низким (фоновым) уровнем концентраций Hg (рис. 2). Наиболее высокими, до ураганых, значениями выделяются гидротермальные глины современных термоаномалий и мономинеральные фракции пирита, выделенного из глин и донных осадков. Солевые отложения отмечаются резко неоднородным распределением Hg, повышенные значения характерны для солей сложного состава, включающих сульфиды.

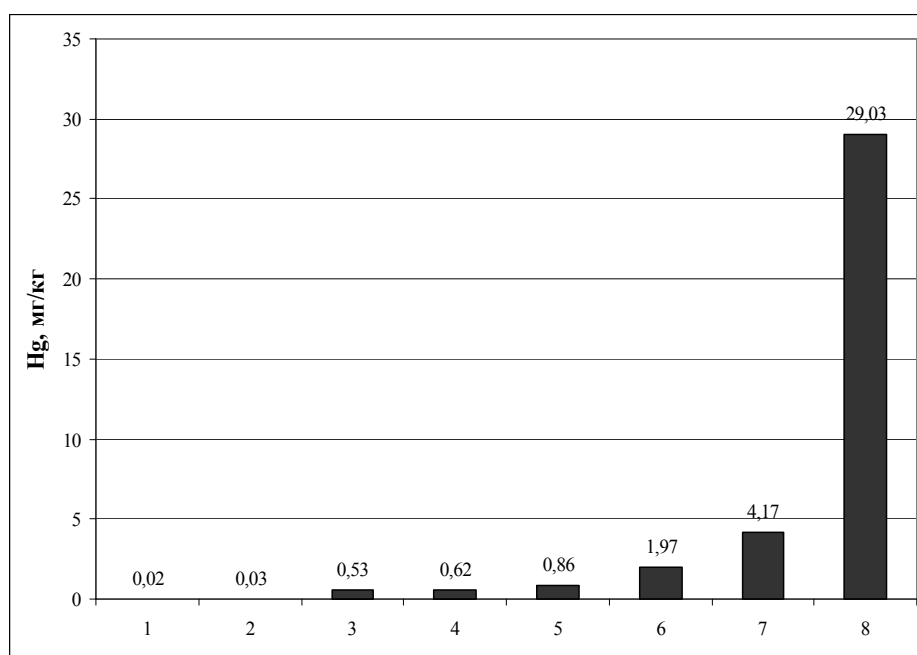


Рис. 2. Средние значения содержания ртути в различных типах твердых отложений. 1 – неизменные горные породы; 2 – лимонит-гематитовые образования («плащи» на поверхности термальных полей); 3 – солевые отложения; 4 – монокварциты; 5 – опалиты и вторичные кварциты; 6 – кремнисто-сульфидные корки на устьях паро-газовых струй; 7 – гидротермальные глины; 8 – мономинеральная фракция пирита.

Гидротермально измененные породы, образовавшиеся на начальных этапах эволюции гидротермальных систем (пропилиты, вторичные кварциты и монокварциты) содержат, в среднем, повышенные концентрации Hg. При существенном объеме этих пород в структуре гидротермальной системы ($> 10 \text{ км}^3$) запасы ртути в них составляют тысячи тонн [9]. Таким образом, гидротермально измененные породы могут служить вторичным источником ртути в современном гидротермальном процессе (см. Заключение). Распределение ртути в природных водах и конденсате пара показывает закономерное увеличение концентраций от фоновых вод (снеговых и речных) к смешанным термальным водам и растворам, которые формируются в грязе-водных котлах (рис. 3). Высокие содержания Hg в конденсате пара подтверждают представления о ведущей роли паро-газовой фазы, как агента в переносе атомарной ртути [2]. Обращают на себя внимание ураганые значения Hg в поровых растворах из гидротермальных глин, что характерно, прежде всего, для начальных этапов аргиллизации

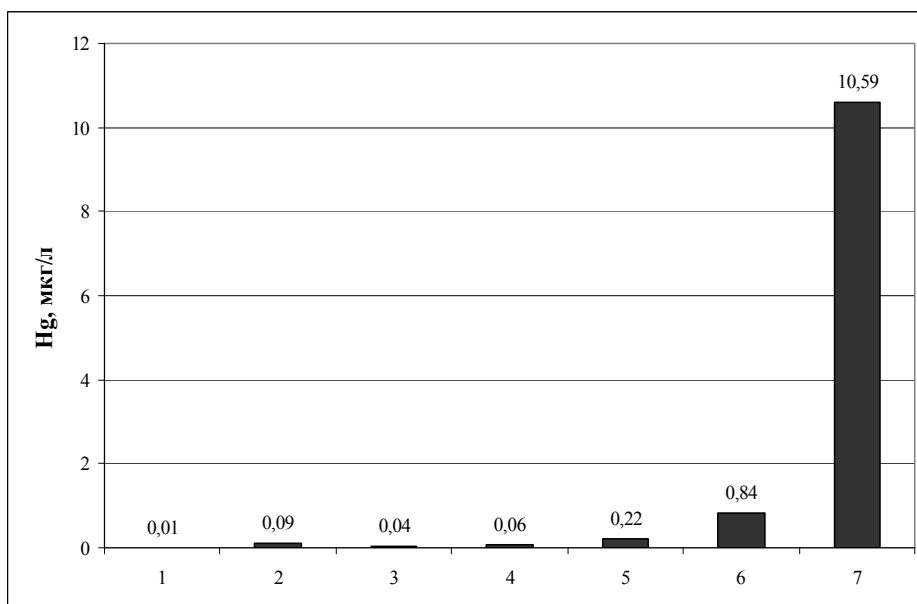


Рис. 3. Средние значения содержания ртути в природных водах. 1 – снеговая вода; 2 – морская вода; 3 – речная вода; 4 – смешанные воды; 5 – гидротермальные растворы из грязе-водных котлов; 6 – пароконденсат; 7 – поровые растворы из гидротермальных глин.

пород [11]. Показательно распределение Hg по разрезу кремнистых осадков, образующихся вследствие излива термальных вод на дневную поверхность (рис. 4). Ртуть высаживается из нейтральных (щелочных) хлоридно-гидрокарбонатных растворов сложного катионного состава практически на фоновом уровне. Но основание толщи таких осадков накапливает ртуть, вероятно, за счет высокой сорбционной емкости илистого и захораниваемого здесь органического материала.

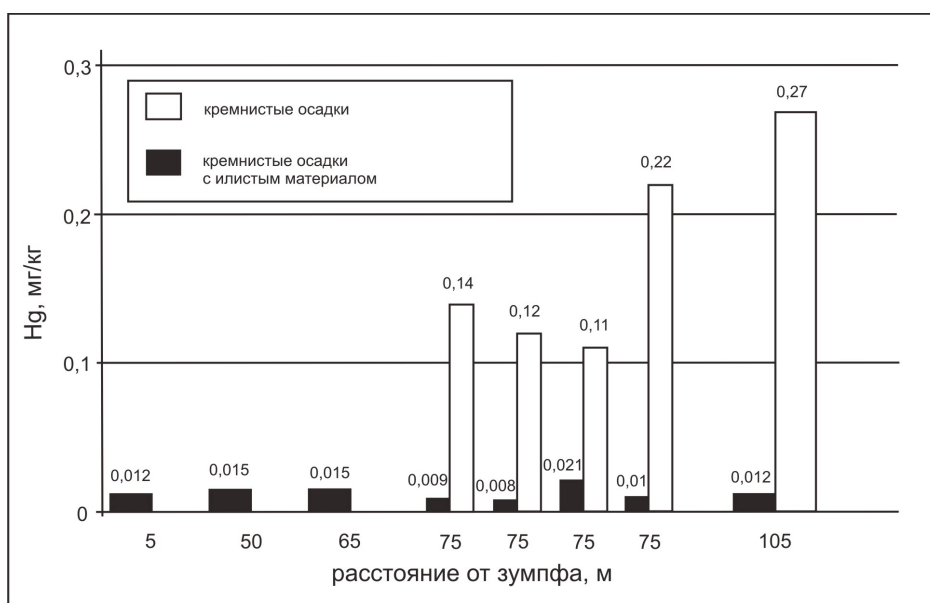


Рис. 4. Распределение ртути в кремнистых отложениях, образующих «плащ» на изливе парогидротерм из скважины ГК-3 (Паужетское геотермальное месторождение). Пробы отобраны последовательно от зумпфа скважины до фронтальной части «плаща». На расстоянии 75 м выполнен профиль из 4-х разрезов вкрест простирания отложений.

В свете изложенного, представляется следующая концептуальная модель транспорта (геохимического цикла) ртути в структуре современной гидротермальной системы (рис. 5).

Hg переносится из нижних высокотемпературных горизонтов системы (от источника тепла, которым чаще всего служит горячее магматическое тело) в составе некоего флюида. Поднимаясь к дневной поверхности, флюид влияет на состав глубинных термальных вод и, соответственно, обогащает их соединениями ртути. Таким образом, в вышележащей области формируются перегретые хлоридно-гидрокарбонатные сложного катионного состава газонасыщенные воды; в транспорте ртути, как и других металлов, широкое участие могут принимать хлоридные комплексы, что отмечают многие исследователи. В зоне активного смешения восходящих термальных и инфильтрационных метеорных вод (зоне гипергенеза) основным агентом переноса ртути к дневной поверхности служит парогазовая смесь. Hg экстрагируется также из вмещающих гидротермально-метасоматических пород за счет циркуляции трещинно-поровых гидротермальных растворов и постепенно (?) отгоняется из недр гидротермальных систем в зону гипергенеза. Зона гипергенеза гидротермальных систем прогрес-

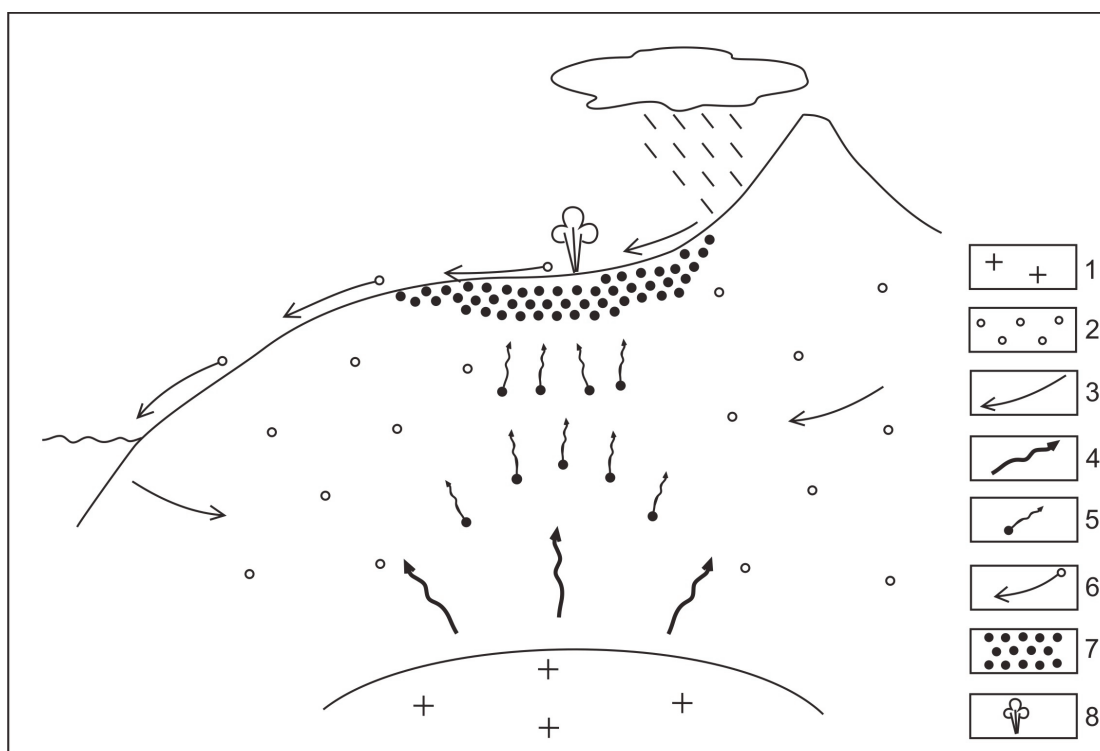


Рис. 5. Модель геохимического цикла ртути в современной гидротермальной системе Южной Камчатки. 1 – глубинный источник тепла; 2 – вмещающие породы, содержащие ртуть; 3 – движение метеорных и морских вод, питающих гидротермальную систему; 4 – глубинный флюид; 5 – транспорт ртути гидротермальными растворами; 6 – транспорт ртути метеорными водами; 7 – области накопления ртути в верхней части зоны гипергенеза гидротермальной системы; 8 – разгрузка парогидротерм на дневной поверхности.

сивного (первого, высокотемпературного) этапа развития служит эффективным геохимическим барьером ртути за счет широкого распространения аргиллизированных пород. При остывании системы значительная часть объема Hg, находящейся в породах и в парогазовой фазе, отгоняется из ее недр. Отгонка происходит даже из нижних слоев близповерхностной толщи гидротермальных глин – вплоть до фоновых значений. На дневной поверхности происходит «вымывание» Hg из глин, кремнистых и др. осадков: таким образом осуществляется механический и химический транспорт ртути разгружающимися термальными и метеорными водами к границам гидротермальных систем. Далее, определенная часть ртути, по-видимому, поступает с инфильтрационными водами в недра гидротермальной системы. Образуется конвективная саморегулирующаяся система, в которой Hg служит элементом-индикатором температуры, динамики, физико-химических свойств теплоносителя и относительного возраста (зрелости) гидротермальной системы и термальных полей. Результаты исследований

могут представлять интерес для оценки влияния гидротермальных систем, как правило, обогащенных ртутью, на биосферу и экологию областей современного и древнего вулканизма.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РФФИ (13-05-00262, 14-05-31158, 14-05-31263).

1. Озерова Н.А. Ртуть и эндогенное рудообразование. М.: Наука. 1986. 232 с.
2. Трухин Ю.П., Степанов И.И., Шувалов Р.А. Ртуть в современном гидротермальном процессе. М.: Наука. 1986. 199 с.
3. 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.
4. Сауков А.А., Айдиньян Н.Х., Озерова Н.А. Очерки геохимии ртути. М.: Наука. 1972. 336 с.
5. Сугробов В.М. Геотермальные ресурсы Камчатки, классификация и прогнозная оценка // Изучение и использование геотермальных ресурсов в вулканических областях. М.: Наука. 1979. С. 26–35.
6. Кононов В.И. Геохимия термальных вод областей современного вулканизма (рифтовых зон и островных дуг) // Труды ГИН, вып. 379. М.: Наука. 1983. 216 с.
7. Структура гидротермальной системы. М.: Наука. 1993. 298 с.
8. Рычагов С.Н., Нуждаев А.А., Степанов И.И. Поведение ртути в зоне гипергенеза геотермальных месторождений (Южная Камчатка) // Геохимия. 2009. № 5. С. 533–542.
9. Рычагов С.Н., Нуждаев А.А., Степанов И.И. Ртуть как индикатор современной рудообразующей газогидротермальной системы (Камчатка) // Геохимия. 2014. № 2. С. 145–157.
10. Белоусов В.И. Геология геотермальных полей. М.: Наука. 1978. 176 с.
11. Нуждаев А.А., Рычагов С.Н. Особенности поведения ртути в зоне гипергенеза Нижне-Кошелевской геотермальной системы (Южная Камчатка) // Материалы региональной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2014.