

На правах рукописи



НУЖДАЕВ АНТОН АЛЕКСЕЕВИЧ

**ПОВЕДЕНИЕ РТУТИ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО  
ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО ПРОЦЕССА  
НА ПРИМЕРЕ ПАУЖЕТСКОЙ, КАМБАЛЬНОЙ И  
КОШЕЛЕВСКОЙ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ КАМЧАТКИ**

**Специальность: 25.00.09 – геохимия,  
геохимические методы поиска полезных ископаемых**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук**

Петропавловск-Камчатский  
2022

**Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН).**

**Научный руководитель:** Бычков Андрей Юрьевич, доктор геолого-минералогических наук, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва.

**Официальные оппоненты:**

Жатнуев Николай Сергеевич, доктор геолого-минералогических наук, Геологический институт СО РАН, лаборатория методов сейсмопрогноза, старший научный сотрудник, г. Улан-Удэ.

Бортникова Светлана Борисовна, доктор геолого-минералогических наук, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, заведующий лабораторией геоэлектрoхимии, г. Новосибирск.

**Ведущая организация:** Дальневосточный геологический Институт ДВО РАН (ДВГИ ДВО РАН), г. Владивосток.

**Защита диссертации состоится** 6 июня 2022 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.059.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИГХ СО РАН) по адресу: 664033, а/я 304, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а.

**С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (<http://www.igc.irk.ru>).**

**Автореферат разослан «\_\_» апреля 2022 г.**

**Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат геол.-мин. наук**

**Е.В. Канева**

## **Введение**

**Актуальность работы.** Ртуть – элемент, активно участвующий во всех этапах рудообразования и используемый в геохимических поисках полезных ископаемых на рудную минерализацию (Сауков, 1972; Фурсов, 1977).

При этом ртуть является токсичным химическим элементом, промышленное использование которого в последнее время активно сокращается. Для корректной оценки антропогенной составляющей поступления ртути в атмосферу необходимы оценки количества поступающей в атмосферу природной ртути. Таким образом, актуальным является изучение природных потоков ртути, особенно, связанных с современным вулканизмом и гидротермальными системами; определение источников поступления ртути; оценка объемов поступления и установление закономерностей ее накопления (Varekamp and Buseck, 1984; Ferrara et al., 2000; Bagnato et al., 2007, 2014, 2018; Tassi et al., 2016; Soto Cárdenas et al., 2018). Получаемые данные по ежегодному выносу ртути в атмосферу важны для мониторинга общей экологической обстановки по всему миру.

Активный вулканизм и современные гидротермальные системы являются одними из основных источников поступления природной ртути на дневную поверхность и, в частности, в атмосферу (Edwards et al., 2021). Работы по изучению поведения ртути на гидротермальных системах Камчатки проводились ранее (Озерова, 1986; Трухин и др., 1989; Алехин и др., 2009, 2010; Vognatto, 2014), однако, несмотря на большой интерес к данной теме, детальные данные по поведению и накоплению ртути в приповерхностных условиях гидротермальных систем, в том числе и на Юге Камчатки, отсутствуют. Для крупных гидротермальных систем, рассматриваемых в данной работе, имелись лишь общие данные о повышенных концентрациях ртути (Трухин и др., 1986; Огородова, 1971), поведение ртути на них оставалось слабо изучено, это и послужило основанием для выполнения представленной работы.

**Целью работы** являлось определение закономерностей поступления и накопления ртути в различных средах в условиях современного гидротермального процесса, выполненное на примере

гидротермальных систем Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района Южной Камчатки.

#### **Основные задачи:**

- Оценка уровня поступления и накопления ртути на термальных полях.
- Выявление особенностей накопления и миграции ртути на разных этапах существования термальных полей.
- Установление основных источников поступления ртути на ранних этапах формирования термальных полей.
- Анализ динамики содержания ртути в подвижные среды крупных термальных полей в связи с извержением 2017 г. близко расположенного вулкана Камбальный.

**Основные объекты исследования** – крупные термальные поля Паужетской, Камбальной и Кошелевской гидротермальных систем Южной Камчатки, объединенные в Паужетско-Камбально-Кошелевский геотермальный район.

#### **Научная новизна**

1. В работе впервые определены концентрации ртути в различных средах, участвующих в современном гидротермальном процессе, на примере термальных полей Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района.
2. Впервые прослежены процессы накопления и миграции ртути в пределах новообразованного Нижне-Кошелевского Нового термального поля.
3. Показано, что основным источником ртути для формирования аномалии, на раннем этапе образования термального поля, являются породы вмещающей толщи с фоновыми концентрациями ртути.
4. Впервые показана связь между активизацией вулкана Камбальный и увеличением концентрации ртути в конденсатах парогазовых струй термальных полей Камбального вулканического хребта.

5. Рассчитаны объемы поступления и плотность потока ртути с наиболее крупных термальных полей Паужетской и Кошелевской гидротермальных систем.

**Методы исследования.** Полевые исследования проводились в летние сезоны 2005-2019 гг. и включали ежегодное наблюдение за состоянием термальных полей, отбор проб твердого, жидкого и газообразного материала для анализа содержания в них ртути. Пробоподготовка включала растирание твердого материала и выделение фракции 0.01-0.02 мм. Определения содержания ртути в пробах выполнялись в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН методом беспламенной атомно-абсорбционной спектрометрии, прибор РА-915. Последний этап включал обработку полученных данных, их анализ и обобщение результатов.

**Практическая значимость.** Полученные данные существенно расширяют имеющиеся представления о характере поступления и распространения ртути в условиях современной гидротермальной активности, что важно для понимания процессов современного рудообразования и функционирования гидротермальных систем, наличие которых неразрывно связано с проницаемыми зонами. Общие данные по концентрациям ртути в тектонически активных районах важны для потенциального предсказания сейсмических и вулканических событий. Ртуть является высокотоксичным элементом и знания об объемах ее выноса и принципах миграции важны для экологии и рационального природопользования. Кроме того, полученный оригинальный материал существенно дополняет фундаментальные знания о геохимии ртути в условиях современного гидротермального процесса.

**Личный вклад автора.** Автор проводил наблюдения за состоянием термальных полей района исследований; отбирал большую часть проб на определение концентраций ртути; выполнял подготовку отобранного материала для исследований; анализировал полученные материалы.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на российских и международных научных конференциях: Всероссийская конференция «Проблемы геохимии эндогенных процессов и окружающей среды» (Иркутск, 2007); Региональная молодежная научная конференция «Исследования в области наук о Земле» (Петропавловск-Камчатский, 2008, 2009, 2013); Российская конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Планета Земля: актуальные вопросы геологии глазами молодых учёных и студентов» (Москва, 2009); «Всероссийский симпозиум по вулканологии и палеовулканологии» (Екатеринбург, 2011); Всероссийское совещание «Современные проблемы геохимии» (Иркутск, 2012; 2018); Научная конференция, посвящённая Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы» (Петропавловск-Камчатский, 2014, 2017); Всероссийское совещание «Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы» (Иркутск, 2015); Научные чтения «Проблемы минералогии, петрографии и металлогении» (Пермь, 2019); Международная конференция «GRC Annual Meeting» (Рено, США, 2009); Международная конференция «World Geothermal Congress» (Бали, Индонезия, 2010; Мельбурн, Австралия, 2015; Рейкьявик, Исландия 2021); Второй международный симпозиум «Ртуть в Биосфере: Эколого-геохимические аспекты» (Новосибирск, 2015); Международная конференция «European Geosciences Union General Assembly» (Вена, Австрия, 2021).

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 24 научных работах, в том числе в 4, опубликованных в журналах из перечня ВАК.

**Благодарности.** Автор благодарен научному руководителю д.г.-м.н. Бычкову А.Ю. за консультацию и обсуждение диссертационного материала. Автор выражает благодарность зав. лаборатории геотермии ИВиС ДВО РАН д.г.-м.н. Рычагову С.Н. за многолетнюю совместную работу, в том числе по теме диссертации. Данная работа не состоялась бы без сотрудничества с постоянными участниками экспедиционных работ, проводимых лабораторией геотермии ИВиС ДВО РАН:

Нуждаевым И.А., Феофилактовым С.О., Букатовым Ю.Ю., Абкадыровым И.Ф., Черновым М.С., Кузнецовым Р.А., Большаковым И.Е., Сергеевой А.В. и многими другими помогавшими в получении полевых материалов. Большой объем аналитических исследований выполнен сотрудниками Института геохимии им А.П. Виноградова СО РАН Андрулайтис Л.Д. и Рязанцевой О.С. Автор благодарит Житову Е.С. за всестороннюю помощь и обсуждение работы.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 151 наименование. Работа изложена на 170 страницах, включает 43 рисунка и 15 таблиц.

#### Содержание работы

**Глава 1. Ртуть в литосфере: высокие концентрации как индикатор активных геодинамических процессов.** Приводится литературный обзор о распределении ртути в земной коре. Практически все крупные проявления ртути контролируются региональными разломами и структурами глубинного заложения, либо находятся в районах с современным проявлением вулканической и гидротермальной активности. Рассмотрены возможности использования данных о концентрациях ртути в почвенной атмосфере для выделения крупных активных разломных зон, а резкие увеличения содержания этого элемента рассмотрены как предвестники сейсмических событий. Показано, что активный вулканизм является существенным источником поступления ртути в атмосферу. Показано, что гидротермальные системы мира за счет своей распространенности и продолжительности существования вносят существенный вклад в общий объем выноса ртути на поверхность земли. Ртуть, поступая на дневную поверхность в составе гидротермальных растворов, может образовывать крупные аномалии, зачастую приуроченные к проницаемым зонам, что позволяет использовать их в качестве поискового признака на проводящие для гидротермального флюида структуры.

**Глава 2. Общая характеристика Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района.** Паужетско-Камбально-Кошелевский геотермальный район (рис. 1) характеризуется проявлениями современного вулканизма, он сложен вулканогенными и вулканогенно-осадочными породами, среди которых наиболее древними являются туфогенно-осадочные палеоген-неогенового возраста (Белоусов, 1978). Вулканические породы четвертичного возраста имеют контрастный состав от базальтов до дацитов (Вакин, 1976). Новейшие центры извержений имеют позднеголоценовый возраст, вулканы Кошелевский и Камбальный считаются действующими (Действующие вулканы..., 1991). Единственное историческое извержение вулкана Камбальный произошло в марте 2017 г. (Гирина и др., 2017). Приводится история геологического изучения района исследования, его структурное положение, геологическое описание трех крупных гидротермальных систем и приуроченных к ним термальных полей.

***Гидротермальная система Кошелевского вулканического массива,*** к которой приурочено два крупных термальных поля: Нижне-Кошелевское и Верхне-Кошелевское. Термальные поля представляют собой участки с проявлениями гидротермальной активности на дневной поверхности: парогазовые струи (на Верхне-Кошелевском поле перегретый пар достигает температуры 170 °С, хотя в среднем температуры составляют порядка 100 °С; на Нижне-Кошелевском поле максимальные температуры достигают 120 °С), пульсирующие водные и грязеводные котлы, грязевые котлы (различаются долей глинистой составляющей в гидротермальном растворе) различной мощности, термальные озера и участки парящего грунта. Температуры грунта на поверхности в наиболее прогретых частях не превышают 100-110 °С. На поверхности всех термальных полей широко развита глинистая толща, мощность которой в пределах одного поля, может колебаться от 0.5 до 10 м. Разгружающиеся на термальных полях Кошелевской системы термальные воды имеют температуры до 100 °С, по составу относятся к) сульфатным, аммониевым или Са(Na)-аммониевым водам с повышенным содержанием кремнекислоты, рН 1.7-6.8. Общая минерализация вод составляет 0.6-0.8 г/л (Калачева и др., 2016). Приводится описание и



история развития Нижне-Кошелевского Нового термального поля – объекта, на примере которого удалось наблюдать редкое природное явление – появление и непродолжительное существование нового термального поля.

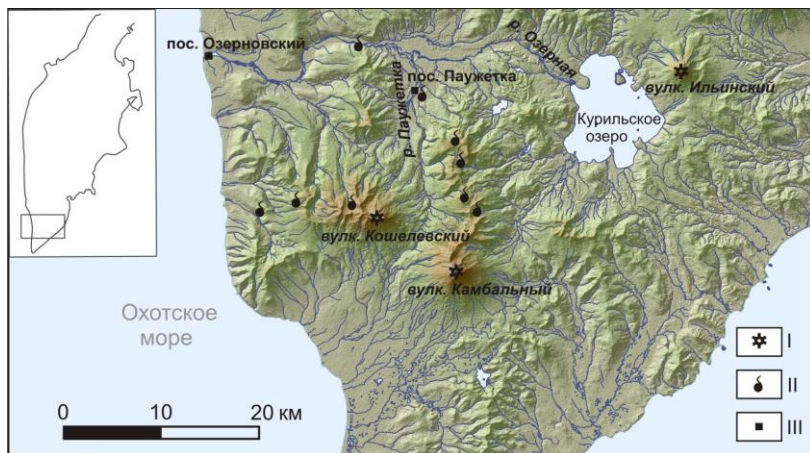


Рис. 1. Обзорная схема Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района (I – активные вулканы; II – наиболее крупные термопроявления района; III – населенные пункты).

**Паужетская гидротермальная система** и приуроченное к ней одноименное геотермальное месторождение являются одними из наиболее изученных на Камчатке. С системой связаны несколько крупных термальных полей, в данной работе рассмотрены два из них: Верхне-Паужетское и Восточно-Паужетское. Основными видами гидротермальной активности являются парогазовые струи небольшой мощности, грязевые и грязеводные котлы, а так же парящие прогретые грунты. Воды, разгружающиеся на термальных полях, имеют температуры до 98 °С и по составу сульфатным и гидрокарбонатно-сульфатным с широким катионным составом, с общей минерализацией, не превышающей 0.8-1.0 г/л, рН 2.2-7.9 (Феофилактов и др., 2020).

**Гидротермальная система Камбального вулканического хребта** связана с близповерхностными магматическими очагами

вулкана Камбальный. На поверхности земли система представлена тремя группами гидротерм: Северная, Центральная и Южная. Проявления гидротермальной активности в виде отдельных котлов и паровых струй наблюдаются практически по всей площади Камбального хребта. В работе рассматриваются три крупных термальных поля: Южно-Камбальное Дальнее, Южно-Камбальное Центральное и Северо-Камбальное. На термальных полях разгружаются гидрокарбонатно-сульфатные аммониевые (кальций-аммониевые) воды, рН 3.6-7.5, с высоким содержанием редких щелочных, цветных и черных металлов, бора, фосфора, редкоземельных элементов. Общая минерализация составляет 4 г/л (Рычагов и др., 2019).

### **Глава 3. Концентрации ртути в различных средах термальных полей Паужетско-Камбально-Кошелевского района**

Приводится основной объем фактического материала по концентрациям ртути, а также дано описание методов отбора, подготовки и анализа проб на определение концентрации ртути в пробах. Пробоотбор проводился в период с 2008 по 2019 г.; отбирались различные типы горных пород, термальная вода и парогазовая фаза. Определение ртути в отобранном материале проводилось с использованием научного оборудования ЦКП «Изотопно-геохимические исследования» Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, прибор РА-915, методом беспламенной атомно-абсорбционной спектрометрии (Андрулайтис, Рязанцев, 2012). Методика определения предполагает точность определения 0.05 мкг/л для водных проб и 5 мкг/кг для твердых проб, погрешность определений составляет, в среднем, 10-20 % (Машьянов и др., 2001).

*Твердый материал* представлен следующими видами горных пород и образований: неизменные горные породы; гидротермально измененные породы (аргиллизиты, опалиты и вторичные кварциты); почвенно-пирокластические отложения; образования на поверхности термальных полей, представленные различными солевыми и кремнистыми отложениями.

*Водные пробы.* Отбирались все типы природных вод на участках проявления гидротермальной активности рассматриваемого

района. Пробы консервировались добавлением  $H_2SO_4$  и двухпроцентного  $KMnO_4$ , согласно методике, разработанной Л.Д. Андрулайтис с коллегами.

*Парогазовые струи* опробовались методом барботирования через поглощающий раствор, по методике предложенной Л.Д. Андрулайтис (Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН).

Всего в работе представлено следующее количество проб, проанализированных на содержание ртути: горные породы – 149, почвенно-пирокластические отложения – 498, глинистая толща – 679, термальные воды – 322, конденсат парогазовых струй – 126.

Полученные данные по концентрациям ртути были разделены по объектам для различных сред и средние значения приведены на рисунке 2. Из полученного материала видно, что каждая система характеризуется собственным уровнем концентрации ртути отличным для разных сред. Среди рассматриваемых подвижных сред наибольшая концентрация ртути наблюдается в конденсатах парогазовых струй, из чего можно заключить, что парогазовые растворы являются основным поставщиком ртути на поверхность термальных полей.

#### **Глава 4. Особенности геохимии ртути в современных гидротермальных системах**

##### *4.1. Общая характеристика поведения ртути на объектах Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района.*

Гидротермальные системы, с которыми связаны крупные термальные поля района, характеризуются разным гидродинамическим типом. Так, Кошелевская и Камбальная гидротермальные системы характеризуются пародоминирующим режимом, а Паужетская гидротермальная система - вододоминирующим. При этом гидротермальные системы отличаются по характеру теплового питания. Формирование Нижне-Кошелевского термального поля связывают с крупной глубинной проницаемой зоной, контролировавшей формирование Кошелевского вулканического массива, по которой, в составе гидротермальных растворов, поступают глубинные флюиды (Писарева, 1987; Сережников, 1978; Вакин и др., 1976). Верхне-Кошелевское термопроявление связывают с зоной контакта крупной близповерхностной интрузии и экструзивного тела

(Вакин и др., 1976). Гидротермальная система Камбального хребта, предположительно, имеет связь с глубинной проницаемой структурой Камбального вулкана, а поступающий глубинный теплоноситель (флюид) имеет мантийную природу и подпитывается теплом и флюидом от остывающих крупных интрузивных тел, образованных вдоль оси Камбального хребта (Структура гидротермальной..., 1993). Образование Паужетской системы связывают либо с тепловым потоком Камбального вулканического хребта (Белоусов и др., 1976), либо с питающими систему малоглубинными интрузиями (Структура гидротермальной..., 1993).

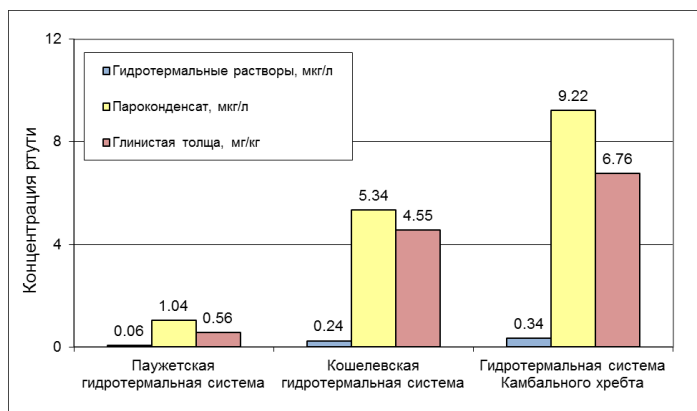


Рис. 2. Средние значения концентраций ртути в различных средах в термальных полях Паужетско-Камбально-Кошелевского района.

Сравнение полученного в работе массива данных по концентрациям ртути, рассмотрено в виде средних значений рассчитанных для различных термальных полей.

*Горные породы.* В качестве фоновых значений горных пород использованы концентрации ртути определенные в неизменных породах Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района – 0.02 мг/кг, что соответствует опубликованным ранее литературным данным (Леонова, 1979). В то же время, для горных пород, подверженных воздействию гидротермальных растворов, характерны концентрации ртути на 1-2 порядка превышающие фоновые. Для Паужетской гидротермальной системы среднее значение

концентрации ртути в гидротермально измененных породах является минимальным среди рассматриваемых объектов и составляет 0.53 мг/кг. Для Кошелевской гидротермальной системы это значение составляет 0.81 мг/кг, а максимальное среднее значение концентрации ртути в измененных породах наблюдается для Камбальной гидротермальной системы – 2.86 мг/кг (рис. 3а).

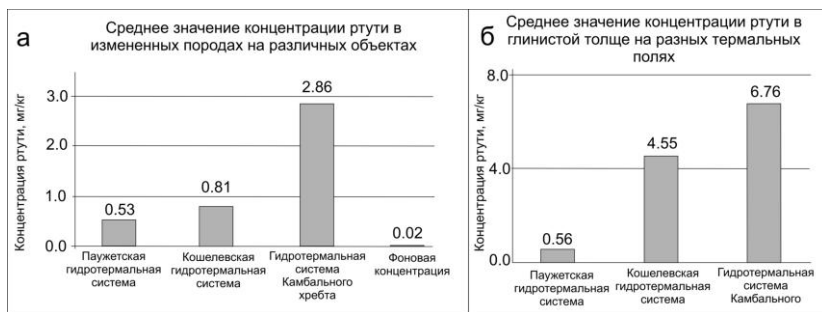


Рис. 3. Средние значения концентрации ртути на различных объектах Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района в гидротермально измененных породах (а) и глинистой толще (б).

*Глинистая толща* широко развита на поверхности всех термальных полей и является средой, накапливающей ртуть, поступающую в составе гидротермальных растворов в период гидротермальной активности. На разных термальных полях концентрации ртути могут отличаться весьма существенно (рис. 3б). Наименьшие концентрации ртути наблюдаются в глинистой толще термальных полей Паужетской гидротермальной системы, а для Кошелевской и Камбальной системы эти значения больше в 9 и 12 раз соответственно.

*Термальные воды* на поверхности термальных полей представлены глубинными гидротермальными растворами, смешанными с метеорными водами. В качестве фоновых значений использовались концентрации ртути в талых водах многолетних снежников, а также речные воды, опробованные вне зоны воздействия гидротермальных систем (0.03 мкг/л). Среди представленных объектов наименьшие значения концентрации ртути наблюдаются на термальных полях Паужетской гидротермальной системы (0.06 мкг/л).

Более высокие значения характерны для растворов Кошелевской гидротермальной системы (0.24 мкг/л) и для термальных вод Камбального вулканического хребта (0.34 мкг/л) (рис. 4а).

*Пароконденсаты.* Среди всех исследованных типов вод самые высокие концентрации ртути характерны для пароконденсата. Для пароконденсата выдерживается тот же ряд средних значений концентрации ртути, что и для термальных вод: термальные поля Паужетской гидротермальной системы (1.04 мкг/л) → термальные поля Кошелевского вулканического массива (5.34 мкг/л) → термальные поля Камбального хребта (9.22 мкг/л) (рис. 4б).

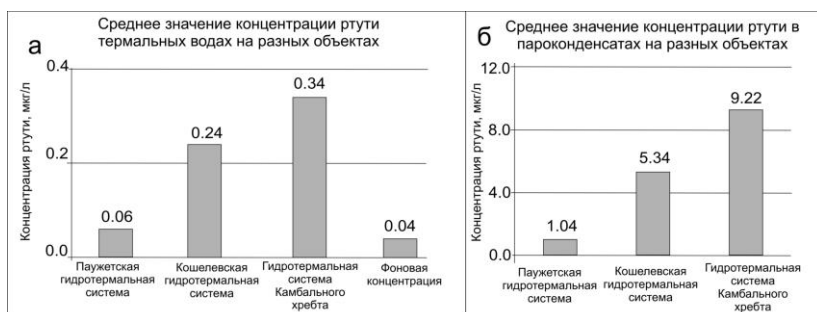


Рис. 4. Средние значения концентрации ртути на разных объектах Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района в гидротермальных растворах (а) и пароконденсатах (б).

Из приведенного материала видно, что Кошелевская и Камбальная гидротермальные системы существенно отличаются от Паужетской по концентрации ртути поступающей на поверхность в перегретых гидротермальных растворах, что, по всей видимости, связано с разницей в источнике теплового питания рассматриваемых систем.

#### **Отсюда следует первое защищаемое положение:**

В пределах гидротермальных систем Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района происходит современное формирование приповерхностных аномалий ртути. Для Камбальной и Кошелевской пародоминирующих систем, во всех средах, характерны

содержания ртути в несколько раз выше, в сравнении с Паужетской вододоминирующей системой.

#### *4.2. Динамика накопления ртути при формировании новых термальных полей*

В 2008 году вблизи Нижне-Кошелевского термального поля нами наблюдалось редкое природное явление – появление новой термальной площадки, названной Нижне-Кошелевское Новое термальное поле. Прогрев новой термоаномалии продолжался около двух лет, а затем последовало остывание. По всей видимости, данное новообразованное термальное поле связано с широко развитыми в данном районе гидротермальными процессами и близко расположенным Нижне-Кошелевским термальным полем, что подтверждено проведенными здесь геофизическими исследованиями (Нуждаев, Феофилактов, 2013). На площади поля были пройдены шурфы в центральной и краевой частях, а также велись площадные наблюдения за поведением ртути в почвенном горизонте. В период существования термального поля было выделено две стадии: прогревания и затухания. Для каждой стадии наблюдались собственные особенности распределения ртути в разрезе почвенно-пирокластического чехла.

Первая стадия – прогрев поля, сопровождающийся интенсивным поступлением ртути и формированием ее аномалий. Эта стадия характеризовалась высокими температурами на всей площади поля, на отдельных участках она достигала 90 °С (2009 г.). По данным площадной съемки проведенной в 2010 году, максимальные концентрации ртути на поле составили 27.25 мг/кг, в то время как фоновые концентрации, для данного участка, находятся на уровне 0.08 мг/кг; максимальные температуры в это время достигали 70 °С. Шурф, пройденный в центральной части поля (на наиболее прогретом участке) на всю мощность почвенно-пирокластического чехла, позволил установить резкий рост температуры с глубиной и высокие концентрации ртути в породах по всему разрезу.

Вторая стадия – затухания, остывания и исчезновения термального поля. Начиная с 2011 года, на площади поля наблюдалось, постепенное снижение температуры и уменьшение

площади (измерена по изолиниям 15 °С и 20 °С) термального поля, и, одновременно, увеличение площади аномалии ртути при уменьшении ее интенсивности. В разрезе центральной части поля 2013 г. наблюдается уменьшение концентрации ртути в нижних и увеличение в верхних горизонтах. На основании этого можно заключить, что имели место перераспределение ранее поступившей и накопившейся в разрезе ртути и ее миграция в верхние горизонты (рис. 5).

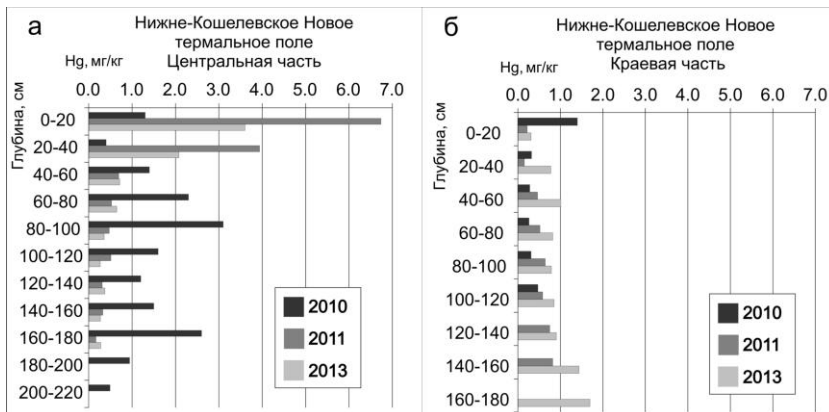


Рис. 5. Распределение концентрации ртути в разрезах почвенно-пирокластического чехла в центральной (а) и краевой части (б) Нижне-Кошелевского Нового поля в период с 2010 по 2013 гг.

### Второе защищаемое положение:

Образование термальных полей может являться высоко динамичным процессом, происходящим в течение нескольких лет и сопровождаться формированием аномалий ртути. На этапе прогрева происходит обогащение ртутью всего почвенно-пирокластического разреза, а на этапе остывания ртуть мигрирует в верхние горизонты и распространяется за пределы термального поля.

### 4.3. Влияние активного вулканизма на гидротермальный процесс в районе Камбального вулканического хребта

Связь вулканической активизации с повышением концентрации ртути в термальных водах была установлена Н.А. Озеровой на вулкане Мутновский в 1963 г. В 2017 году произошло



первое историческое извержение вулкана Камбальный, расположенного в южной оконечности Камбального хребта (Гирина и др., 2017; Рычагов и др., 2017). Поскольку вулканическая активность может сопровождаться повышением концентрации ртути, для установления возможности таких изменений на термальных полях Камбального хребта были поставлены работы по измерению концентрации ртути в термальных водах и конденсатах парогазовых струй. В качестве объектов были выбраны: Северо-Камбальное и Южно-Камбальное Центральное термальные поля. Ежегодное опробование проводилось на протяжении трех лет с 2017 по 2019 гг. Кроме того, имелись данные опробования 2011, 2012 годов с площади Северо-Камбального термального поля.

*Северо-Камбальное термальное поле.* До извержения (2011 и 2014 г.) концентрация ртути в термальных водах находилась в интервале 0.01-0.25 мкг/л при среднем значении 0.11 мкг/л. После извержения (2017 г.) средняя концентрация ртути находилась в интервале 0.01-0.20 мкг/л, при среднем значении 0.10 мкг/л., то есть изменений в концентрации ртути в гидротермальных растворах не наблюдалось.

В конденсатах парогазовых струй (рис. 6а) до извержения (2011 г.) среднее значение концентрации ртути находилось на уровне 3.5 мкг/л. После извержения среднее значение концентрации ртути в конденсатах парогазовых струй составляло 13.49 мкг/л (2017 г.); 7.76 мкг/л (2018 г.); 3.64 мкг/л (2019 г.).

*Южно-Камбальное Центральное термальное поле.* Опробование гидротермальных растворов на данном поле проводилось в 2017-2019 годах и никаких видимых изменений в концентрации ртути не показало.

Ежегодное опробование парогазовых струй с 2017 по 2019 годы показало постепенное уменьшение концентрации ртути в отобранных конденсатах: 16.8 мкг/л (2017 г.); 15.7 мкг/л (2018 г.); 9.7 мкг/л (2019 г.) (рис. 6б).

Полученные данные показывают, что в пароконденсатах, опробованных на Северо-Камбальном термальном поле, после извержения вулкана Камбальный произошло увеличение концентрации ртути более чем в три раза. Затем, в течение нескольких

лет, наблюдалось постепенное уменьшение концентрации ртути, и к 2019 году значения вернулась на уровень, наблюдавшийся до извержения вулкана (рис. 6а). На Южно-Камбальном Центральном термальном поле, так же наблюдалось постепенное уменьшение концентрации ртути в период с 2017 по 2019 годы.

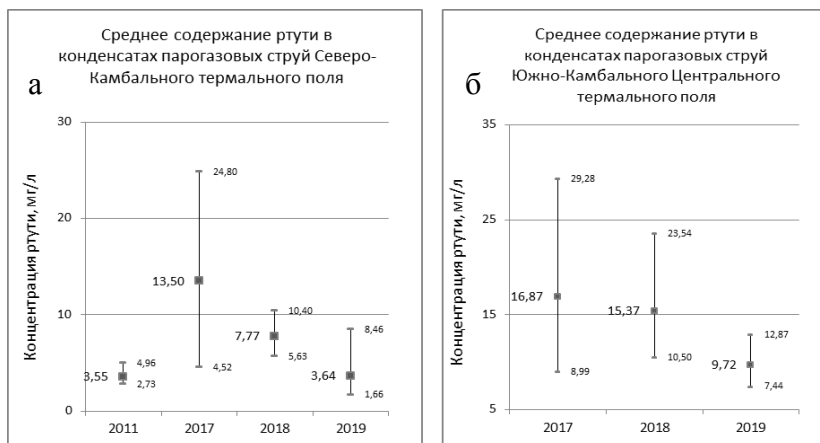


Рис. 6. Средние содержания концентрации ртути в пароконденсатах: а – Северо-Камбального термального поля; б – Южно-Камбального Центрального термального поля.

В термальных водах, опробованных на термальных полях Камбального хребта, не зафиксировано изменений концентрации ртути в указанный период, что, вероятно, связано с их значительным разбавлением метеорными водами. Стоит отметить, что ранее подобная связь между концентрацией ртути и вулканической активностью фиксировалась на примере вулканических газов (Озерова, 1986; Pyle, Mather, 2003; Varekamp, 1980; Bagnato et al., 2009, 2014, 2018; Ferrara et al., 2000; Меняйлов и др., 1984). В настоящей же работе впервые показана взаимосвязь между повышением ртути в парогазовой фазе гидротермальной системы Камбального хребта с активизацией близко расположенного вулкана Камбальный.

### **Отсюда следует третье защищаемое положение:**

Увеличение концентрации ртути в парогазовых струях термальных полей Камбального вулканического хребта после извержения вулкана Камбальный доказывает влияние активного вулканизма на интенсивность потока ртути в гидротермальной системе.

#### *4.4. Оценка потоков ртути на современных термальных полях.*

На поверхности термальных полей происходят активные процессы накопления ртути. При этом остается открытым вопрос оценки объемов накопленной ртути и скорости накопления данных объемов. Для решения данной задачи на площади крупных термальных полей Кошелевской и Паужетской гидротермальных систем были проведены работы по подсчету количества ртути накопленной в глинистой толще. Определялась площадь термальных полей, объем глинистой толщи и количество накопленной в ней ртути. Для количественной оценки объемов выброса ртути с термальных полей Кошелевской и Паужетской гидротермальных систем было рассчитано значение потока выноса ртути парогазовыми струями на единицу площади. Результаты данных расчетов приведены в табл. 1.

Зная площадь поля, объемы выносимого с поля пара, концентрацию ртути в конденсатах пара, а также количество конденсата, отбираемого с единицы объема пара, получаем, что для термальных полей Паужетской системы эти значения близки и составляют  $8 \times 10^{-7}$  г/(сут  $\times$  м<sup>2</sup>) для Восточно-Паужетского и  $2 \times 10^{-7}$  г/(сут  $\times$  м<sup>2</sup>) для Верхне-Паужетского термального поля. В то же время, для термальных полей Кошелевской системы эти значения существенно выше, но при этом близки друг к другу и составляют  $2.9 \times 10^{-4}$  г/(сут  $\times$  м<sup>2</sup>) для Нижне-Кошелевского и  $2.1 \times 10^{-4}$  г/(сут  $\times$  м<sup>2</sup>) для Верхне-Кошелевского термального поля. Несколько более сложный расчет был произведен для Нижне-Кошелевского Нового термального поля, так как вынос пара на поверхности поля не фиксировался, однако имелись данные о температурах в разрезах на площади поля. Для расчета теплового потока на участках термальных полей без видимого парения применяется формула (Дрознин, 2014):

$$q = \lambda(T_{100} - T_{15}) / 0.85 \quad \text{Вт/м}^2$$

где теплопроводность грунта принимается  $\lambda = 0.4 \text{ Вт/(м}^2 \times \text{К)}$ ,  $T_{100}$  – температура на глубине 100 см, и  $T_{15}$  – температура на глубине 15 см. Зная количество пара необходимого для переноса 1 Вт, можно рассчитать объем поступающего пара, а значит и поток поступления ртути (табл. 1).

Таблица 1. Оценка накопления и выноса ртути на наиболее крупных термальных полях Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района.

	Восточно-Паужетское терм. поле	Верхне-Паужетское терм. Поле	Нижне-Кошелевское терм. Поле	Верхне-Кошелевское терм. поле	Нижне-Кошелевское Новое терм. поле
Площадь поля, тыс. м <sup>2</sup>	21.5	22.0	51.0	60.0	14.7
Объем глинистой толщи, тыс. м <sup>3</sup>	112.6	81.0	102.0	120.0	26.4
Масса глинистой толщи, тыс. т.	180.1	129.6	163.2	192.0	42.3
Плотность глинистой толщи, г/см <sup>3</sup>	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60
Концентрация ртути в глинистой толще, мг/кг	0.64	0.42	4.52	1.55	1.06
Кол-во ртути в верхних горизонтах терм. поля, кг	115	54	750	300	50
Объем пара, выносимого с поля, л/мин	350	400	80000*	140000*	0.3
Поток выноса ртути, г/(сут × м <sup>2</sup> )	$8 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$2.9 \times 10^{-4}$	$2.1 \times 10^{-4}$	-

\*По данным Е.А. Вакина (1976).

Полученные и приведенные в таблице 1 данные позволяют дать количественную оценку времени, скорости и объемам накопления ртути в пределах рассматриваемых термальных полей, а так же наглядно демонстрируют, что Кошелевская гидротермальная система, являясь более мощной, в сравнении с Паужетской системой и характеризуется существенно более высоким (на три порядка) потоком выноса ртути. Кроме того, полученные данные позволяют проводить сравнение с подобными объектами по всему миру.

Полученные в ходе выполнения работы и приведенные в таблице 1 данные показывают, что на долгоживущих термальных полях Верхне-Паужетском и Восточно-Паужетском количество ртути сопоставимо с количеством ртути на новообразованном Нижне-Кошелевском Новом термальном поле. При этом очевидно, что накопление ртути на Паужетских термальных полях происходило в течение всего времени их существования, в течение тысяч лет, тогда как количество ртути на Нижне-Кошелевском Новом поле было накоплено в течение двух лет с 2008 по 2010 гг. При этом, значения теплового потока, а, следовательно, объем пара и ртути, не могут объяснить такого резкого увеличения концентрации ртути. Наиболее очевидным является предположение, что источником накопившейся ртути могли служить вмещающие породы с фоновыми концентрациями ртути. Для проверки данного предположения был произведен расчет необходимого объема вмещающих пород, экстрагирование ртути из которых могло бы обеспечить получение накопленного количества ртути. Для расчета принимались фоновые концентрации ртути равные 0.02 мг/кг. Расчеты показали, что при условии полного извлечения ртути из вмещающей толщи необходим объем породы мощностью порядка 100 м и площадью, соответствующей таковой для термального поля. При этом не вызывает сомнения, что объемы вовлеченных в процесс горных пород были существенно выше.

По всей видимости, при формировании Нижне-Кошелевского Нового термального поля тепловой поток мобилизует ртуть из вмещающих горных пород, которая мигрирует к поверхности и сорбируется в приповерхностных горизонтах. Формирование аномалий ртути на ранних этапах образования термальных полей обеспечивается поступлением как глубинной ртути, поступающей в составе гидротермальных растворов, так и ртути экстрагированной из вмещающих пород, однако последняя является доминирующей.

### **Заключение**

В ходе работы впервые выполнено систематическое определение концентрации ртути в различных средах и породах на термальных полях Паужетско-Камбально-Кошелевского

геотермального района. Анализ полученных данных позволил установить, что поступление и накопление ртути контролируется крупными гидротермальными системами района, накопление ртути происходит во всех средах, участвующих в гидротермальном процессе. При этом наиболее интенсивное накопление ртути происходит в глинистой толще, а основными агентами, поставляющими ртуть к дневной поверхности, являются гидротермальные растворы.

В ходе полевых наблюдений зафиксировано редкое природное явление – формирование и исчезновение нового термального поля. Это позволило получить уникальную информацию по накоплению и перераспределению ртути, характерному для разных этапов формирования термальных полей. Показано, что при формировании новых термальных полей происходит резкое увеличение концентрации ртути в приповерхностных горизонтах. При этом, накопленное на Новом поле количество ртути превышает количество ртути переносимое паром, в объеме соответствующем зафиксированному тепловому потоку. На основании этого предположено, что большая часть ртути является продуктом мобилизации из вмещающих пород, подверженных прогреву.

На основании данных о концентрации ртути в глинистой толще на поверхности термальных полей Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района были подсчитаны объемы ртути, накопленной на современных термальных полях Паужетской и Кошелевской гидротермальных систем. Были рассчитаны потоки современного выноса ртути с площади наиболее крупных термальных полей Паужетской и Кошелевской гидротермальных систем, отражающие современный вынос ртути в атмосферу.

В период выполнения данной работы произошло первое историческое извержение вулкана Камбальный. В ходе анализа содержания ртути в пробах пароконденсата с термальных полей показано, что после извержения зафиксировано увеличение концентрации ртути в конденсатах парогазовых струй, сохранявшееся в течение 2-3 лет. Таким образом, удалось установить влияние современного вулканизма на вынос ртути гидротермальной системой Камбального вулканического хребта.

## Список публикаций по теме диссертации.

### *Статьи опубликованные в журналах из перечня ВАК:*

1. Рычагов С.Н., Нуждаев А.А., Степанов И.И. Поведение ртути в зоне гипергенеза геотермальных месторождений (Южная Камчатка) // Геохимия. – 2009. – № 5. – С. 533-542.
2. Рычагов С.Н., Нуждаев А.А., Степанов И.И. Ртуть как индикатор современной рудообразующей газо-гидротермальной системы (Камчатка) // Геохимия. – 2014. – № 2. – С. 145-157.
3. Гирина О.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Нуждаев А.А. Извержение вулкана Камбальный в 2017 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14. – № 2. – С. 263-267.
4. Калачева Е.Г., Рычагов С.Н., Королева Г.П., Нуждаев А.А. Геохимия парогидротерм Кошелевского вулканического массива (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. – 2016. – № 3. – С. 41-56.

### *Список тезисов докладов опубликованных по теме диссертации:*

Нуждаев А.А., Рычагов С.Н., Степанов И.И. Ртуть в зоне гипергенеза геотермальных месторождений (Южная Камчатка) // Проблемы геохимии эндогенных процессов и окружающей среды, Иркутск. – 2007. – Т.2. – С. 82-86;

Рычагов С.Н. Нуждаев А.А., Степанов И.И. Особенности миграции ртути в современных рудообразующих газо-гидротермальных системах (Южная Камчатка) // Материалы всероссийского совещания «Современные проблемы геохимии», Иркутск – 2012;

Нуждаев А.А., Чернов М.С., Феофилактов С.О., Нуждаев И.А. Нижне-Кошелевское Новое термальное поле: история появления и развитие // Материалы XI региональной молодежной научной конференции «Исследования в области наук о Земле», Петропавловск-Камчатский. – 2013. – С.111-124;

Рычагов С.Н., Нуждаев А.А., Степанов И.И. Геохимическая модель транспорта ртути в современных гидротермальных системах (Южная Камчатка) // Второй международный симпозиум «Ртуть в Биосфере: Эколого-геохимические аспекты». Новосибирск. – 2015. – С. 304-308;

Нуждаев А.А., Рычагов С.Н. Кошелевская флюидная система и рудообразование (Южная Камчатка) // Материалы всероссийского совещания «Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы», Иркутск, ИЗК СО РАН. – 2015. – С. 117-119;

Житова Е.С., Нуждаев А.А. Минеральное разнообразие солей термальных полей Южной Камчатки // Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы», Петропавловск-Камчатский, ИВиС ДВО РАН. – 2017. – С. 166-168;

Нуждаев А.А. Изучение поведения ртути на термальных полях Южной Камчатки // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. – 2019. – № 22. – С. 359-362;

Нуждаев А.А. Поведение ртути на термальных полях Камбального Хребта (Южная Камчатка) // Вопросы естествознания. – 2018. – № 4 (18). – С. 31-35;

Нуждаев А. А., Кузнецов Р. А., Чернов М. С. Оценка объемов глинистой толщи и содержаний в ней ртути в пределах Восточно-Паужетского термального поля // Вулканизм и связанные с ним процессы. – 2021. – С. 139-141.

Rychagov S., Nuzhdayev A. Prospects of geothermal power-industry development on South Kamchatka: Koshelevskaya hydrothermal-magmatic system // GRC Annual Meeting, Reno, Nevada, USA. – 2009. – 8 p;

Rychagov S. N., Nuzhdayev A. A. The Koshelevsky Volcanic Block as a Prospective Site for the Development of Geothermal Power Industry on the South of Kamchatka // Proceedings World Geothermal Congress, Indonesia, – 2010;

Rychagov S. N., Nuzhdayev A. A., Stepanov I. I. Mercury as an indicator of temperature and geochemical barriers in hypergenesis zone of geothermal deposits (Kamchatka) // Proceedings World Geothermal Congress, Indonesia, – 2010;

Rychagov S.N., Koroleva G.P., Davletbayev R.G., Nuzhdayev A.A., Rychagova T.S. Influence of silica deposition on a geothermal deposit, landscape and ecological situation (Case study: the South Kamchatka and the Northern Kuril Islands) // Proceedings World Geothermal Congress, Indonesia, – 2010;

Nuzhdayev A. A., Rychagov S. N., Chernov M. S., Feofilaktov S. O., Nuzhdayev I. A. Formation of a New Geothermal Field in the Area of the Nizhne (Lower)-Koshelevsky Geothermal Deposit (South Kamchatka): a Natural or Man-Made Phenomenon? // Proceedings World Geothermal Congress, Australia – New Zealand. – 2015;

Kalacheva E., Rychagov S., Koroleva G., Nuzhdayev A. Hydrothermal Gas-Vapour Outflows of the Koshelevsky Volcanic Massif (South Kamchatka): Composition and Origin Conditions // Proceedings World Geothermal Congress, Australia – New Zealand. – 2015.

Nuzhdayev A. A. Variations in Mercury Concentrations at the Thermal Fields of the Kambalny Range as a Consequence of the Kambalny Volcano Eruption (Kamchatka, Russia) // Proceedings World Geothermal Congress. Iceland. – 2020.