

УДК 553.078.2

СЕВЕРО-КУРИЛЬСКОЕ ГЕОТЕРМАЛЬНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ: ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

© 2004 г. С. Н. Рычагов, В. Г. Пушкарев, В. И. Белоусов, Д. Ю. Кузьмин, А. В. Мушинский,
Е. И. Сандиминова, И. А. Бойкова, О. В. Шульга, А. Г. Николаева, Н. П. Егорова

Институт вулканологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

Поступила в редакцию 11.03.2002 г.

Выполнены морфоструктурные, геологические, геофизические и газогеохимические исследования на восточном склоне хребта Вернадского, прилегающем к г. Северо-Курильску (о. Парамушир). Показано строение участков локализации близповерхностных и глубинных термальных вод. Полученные данные имеют принципиальное значение для создания концептуальной и разведочной моделей Северо-Курильского геотермального месторождения и понимания механизмов формирования современной рудной минерализации в недрах гидротермально-магматической конвективной системы.

ВВЕДЕНИЕ

Северо-Парамуширская гидротермально-магматическая конвективная система и входящий в ее состав один из самых опасных действующих вулканов Курильских островов, влк. Эбеко, привлекают внимание исследователей в течение многих десятилетий [6, 7, 10, 13-15, 21, 25, 28, 29]. Интерес к данным объектам определяется островным положением гидротермально-магматической системы на стыке континентальной и океанической земной коры, большой мощностью системы, наличием современного активного андезитового вулкана в ее центральной части, сложным строением предполагаемой области питания вулкана. Существуют также данные о выносе на дневную поверхность вместе с продуктами газогидротермальной деятельности рудных элементов [7, 16], а в последние годы на фактическом материале глубокого бурения показано, что в недрах Северо-Парамуширской современной высокотемпературной гидротермально-магматической системы происходит формирование золотополиметаллического оруденения и, возможно, зарождение минерализации медно-порфирового типа [21].

Геотермальное электро- и теплоснабжение, по опыту эксплуатации геотермальных месторождений Камчатки и многих стран мира, является существенно более дешевым и экологически чистым производством, в сравнении с использованием углеводородного сырья, и при соблюдении технологического режима исключает перебои с поставками энергии. Вместе с тем, энергетика Курильских островов до настоящего времени работает исключительно за счет привозного топлива. По данным исследований современных гидротермальных систем на Курильских островах [12, 19, 22, 26], геотермальные электрические или

тепловые станции требуемой мощности могут быть построены в районе расположения каждого крупного населенного пункта: г. Южно-Курильска (о. Кунашир), г. Курильска (о. Итуруп), г. Северо-Курильска (о. Парамушир) и на других островах. Так, прогнозные запасы предполагаемого Северо-Курильского геотермального месторождения (восточного сектора, прилегающего к Северо-Курильску) составляют от 60 до 100 МВт/100 лет эксплуатации [2, 26], что является надежным основанием для постановки поисково-разведочных работ, детального изучения месторождения и строительства ГеоТЭС. Научные изыскания обычно сопровождают все этапы освоения геотермального месторождения и имеют как практическое, так и фундаментальное теоретическое значение для понимания магматических, гидротермальных и экзогенных процессов, участвующих в формировании месторождения.

В настоящей статье обсуждаются результаты комплексного изучения строения предполагаемого Северо-Курильского геотермального месторождения, расположенного на восточном склоне хребта Вернадского между Северо-Курильском и вулканами Эбеко и Неожиданный (рис. 1). Именно эта территория наиболее перспективна для получения данных о глубинных геотермальных и гидротермальных рудообразующих процессах, происходящих в недрах Северо-Парамуширской системы, и решения задач теплоэнергоснабжения г. Северо-Курильска в связи с наличием здесь восходящего теплового потока, разгрузки термальных вод и мощных зон парообразования на глубине [2, 21], а также вследствие наибольшей практической доступности этой площади для геотермальной разведки. Несмотря на то что на предыдущем этапе исследований территория была лучше всего изу-

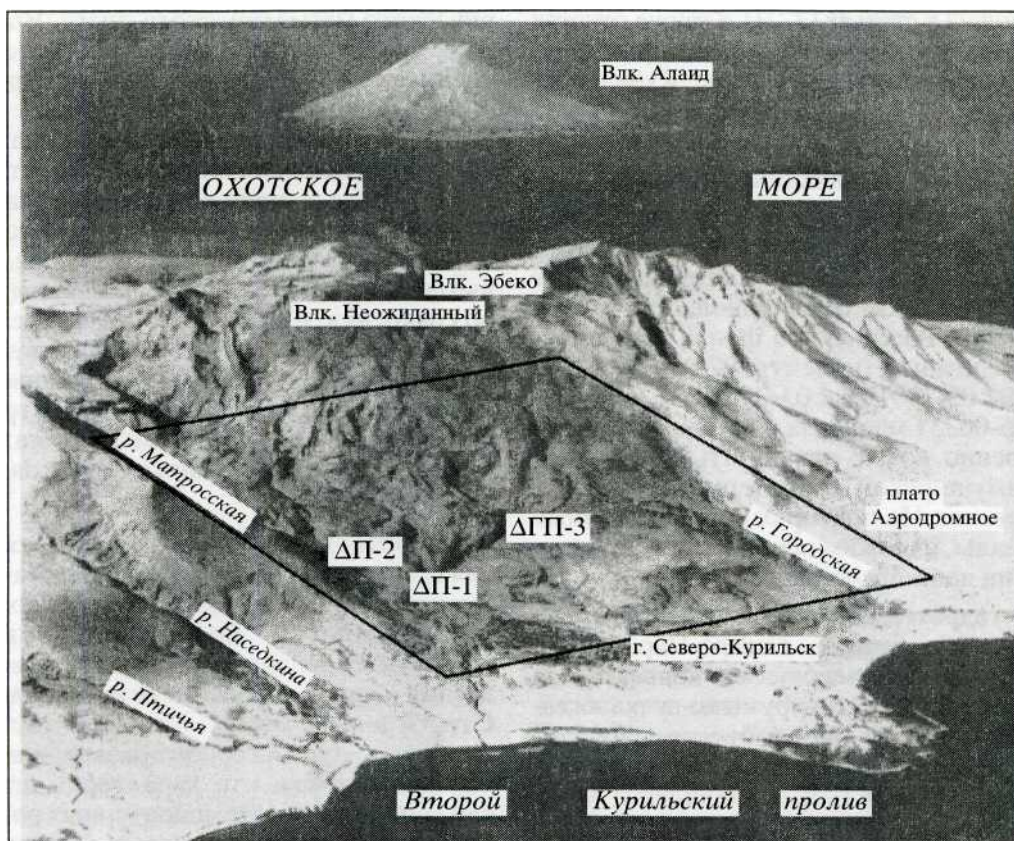


Рис. 1. Восточный склон хребта Вернадского: площадь распространения Северо-Курильского геотермального месторождения. Квадратом показан участок детальных исследований размером 20 км² (рис. 2-6), треугольники - места расположения глубоких скважин и их номера. Снимок сделан В.Н. Двигало во время последнего крупного извержения вулкана Эбеко (1987-1991 гг.).

чена при проведении геолого-геофизических изысканий и бурении глубоких скважин [3, 5, 17¹], здесь не выделены геологические структуры, контролирующие восходящий газо-гидротермальный поток и нисходящие инфильтрационные воды. Именно этот вопрос решается нами на настоящем этапе исследования Северо-Парамуширской гидротермально-магматической системы и Северо-Курильского геотермального месторождения.

Таким образом, в задачи исследований входило уточнение блокового геологического строения и структуры проницаемости Северо-Парамуширской гидротермально-магматической системы, в первую очередь, ее центральной части и восточного сектора, прилегающего к Северо-Курильску; создание геолого-геохимической модели Северо-Курильского геотермального месторождения (восточного сектора системы) и разработка на ее основе рекомендаций по выбору структур, наиболее перспективных на парогидротермы. Комплексные геолого-геофизические и

геохимические исследования были проведены на площади около 20 км² в масштабе 1:25000.

Основное содержание исследований заключалось в следующем.

1. Изучение опорного геологического разреза, блоковой тектонической структуры и проницаемых разрывных нарушений Северо-Парамуширской гидротермально-магматической системы на основе морфоструктурного анализа и ртутнометрической съемки.

2. Магнитометрическая съемка с целью картирования глубинной геологической структуры Северо-Парамуширской гидротермально-магматической системы и геотермального месторождения.

3. Изучение газового состава и гидрохимического режима системы и геотермального месторождения для выявления скрытых температурных аномалий и выделения геологических структур, контролирующих аномальный тепловой поток.

Геологическая структура Северо-Курильского геотермального месторождения. История геологического развития Северных Курильских островов и Северо-Парамуширской гидротермально-магматической системы изложена в [4-6, 17,

¹ Мишин В.Б. Отчет на подготовку геофизической основы для поисков в восточной части Северо-Парамуширской геотермальной системы. Елизово: Фонды ЕГФЭ, 1993. 140 с.

24, 29] и обобщена в статьях [2, 21], а также отчетах ИВ ДВО РАН по Федеральной целевой программе "Социально-экономическое развитие Курильских островов Сахалинской области до 2005 года"; косвенные сведения о структуре района и возрасте отложений содержатся в публикациях [1, 8].

Преыдушие исследования носили региональный характер, либо имели отношение только к современному вулкану Эбеко. Постановка работ в 1997-2001 гг. в рамках отмеченной Программы и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 97-05-65006, 00-05-64175 а, 02-05-79019 к, 03-05-64044 а, 03-05-79032 к, 03-05-06331 мас) дала возможность получить качественно новые результаты в изучении Северо-Парамуширской гидротермально-магматической системы. Не повторяя опубликованные ранее материалы, изложим основные представления о строении данной системы.

Строение гидротермально-магматической системы, обобщенные данные.

Северо-Парамуширская гидротермально-магматическая конвективная система является сложной (интрузивно-вулканогенного происхождения), крупной (объемом $>700 \text{ км}^3$) и длительноразвивающейся ($n \times (10^3-10^5)$ лет) геологической структурой [20], находящейся в настоящее время на этапе становления островной дуги. Питание системы осуществляется за счет передачи тепла и вещества от магматического источника, происхождение которого может быть как первичным (генерация расплавов базальтового и андезито-базальтового состава на нескольких структурных уровнях: верхняя мантия - периферический магматический очаг - субвулканическое тело), так и вторичным (выделение тепла за счет химических реакций, вплоть до получения расплавов) [2]. Вторичные источники тепла могут локализоваться на разных участках рассматриваемой крупной гидротермально-магматической структуры и создавать приповерхностные (до глубины 1000-1500 м) небольшие по размерам горячие зоны.

Опорный геологический разрез (скважина ГП-3 глубиной 2500 м) сложен четырьмя комплексами пород, контролирующими основные геотермальные процессы [21]. Толща глубокозалегающих туфов интрузивного происхождения является наиболее вероятной зоной перетока высокотемпературного флюида и свидетельствует о близости источника нагрева - крупного диоритового тела или перифе-

рического магматического очага. Вышезалегающие литокристаллокластические псефопсаммитовые туфы мощностью 700 м контролируют основной поток хлоридно-натриевых термальных вод. Перекрывают туфы окварцованные вулканогенно-осадочные породы мощностью до 800 м, обладающие водоупорными свойствами. Верхняя толща представлена лавами андезитового и андезито-базальтового состава, относительно массивными и наименее гидротермально измененными по сравнению с другими породами разреза. Такой геологический разрез свидетельствует о формировании пород в условиях резких инверсий тектонических движений в пределах островной дуги, особенно на заключительных этапах, предшествующих излиянию мощных потоков лав четвертичного возраста.

Гидротермально-метасоматические изменения пород в опорном разрезе представлены тремя зонами. Интервал 1650-2500 м сложен средне-температурными пропилитами кварц-хлорит-эпидот-мусковитового состава и вторичными кварцитами - кварц-эпидозитами (в основании разреза). С глубиной увеличивается частота встречаемости ангидрита - до массового развития в породах основания разреза, что характерно при смешении глубинных высокотемпературных растворов хлоридно-натриевого состава с морскими водами. Интервал 750-1650 м - кварц-адуляр-гидрослюдистые метасоматиты. По всему интервалу развиты кварц-адулярные жилки с включениями рудных минералов. Мы полагаем, что данная часть разреза является мощной зоной вскипания гидротерм, на границах которой в настоящее время формируются рудные геохимические барьеры. Интервал 100-750 м представлен низкотемпературными тридимит-кристобалит-опал-халцедон-кварцевыми метасоматитами с включениями рудных минералов, замещающих, в основном, органическое вещество туффинов. Метасоматиты выполняют поры-пустоты-трещины, часто замещают цемент первичных пород и, вероятнее всего, образуются за счет высаживания кремнезема из пароводяной смеси при кипении растворов. Интенсивное окремнение пород над мощной зоной кипения гидротерм усиливает прочностные и водоупорные свойства вулканогенно-осадочной толщи. Состав зон гидротермального изменения пород, характер границ и переходов от зоны к зоне, постепенная смена температур минералообразования снизу вверх и другие данные говорят о формировании метасоматитов в результате однонаправленного процесса за счет продвижения фронта гидротермально-магматического флюида от субвулканического тела к дневной поверхности. На эти зоны накладываются метасоматиты области интенсивного кипения гидротерм. Формирование верхнего водоупорного горизонта в результате окремнения пород над областью кипения гидротерм способст-

Рычагов С.Н., Пушкарёв В.Г., Белоусов В.И. и др. Научно-технический отчет по выполнению НИОКР по теме "Исследование гидротермально-магматических систем, геотермальных и рудных месторождений, создание геолого-геохимических моделей гидротермально-магматических систем как основа для постановки поисково-разведочных работ на геотермальных месторождениях. Слежение за состоянием вулкана Эбеко". Петропавловск-Камчатский, 2000. 204 с. Фонды ИВ ДВО РАН.

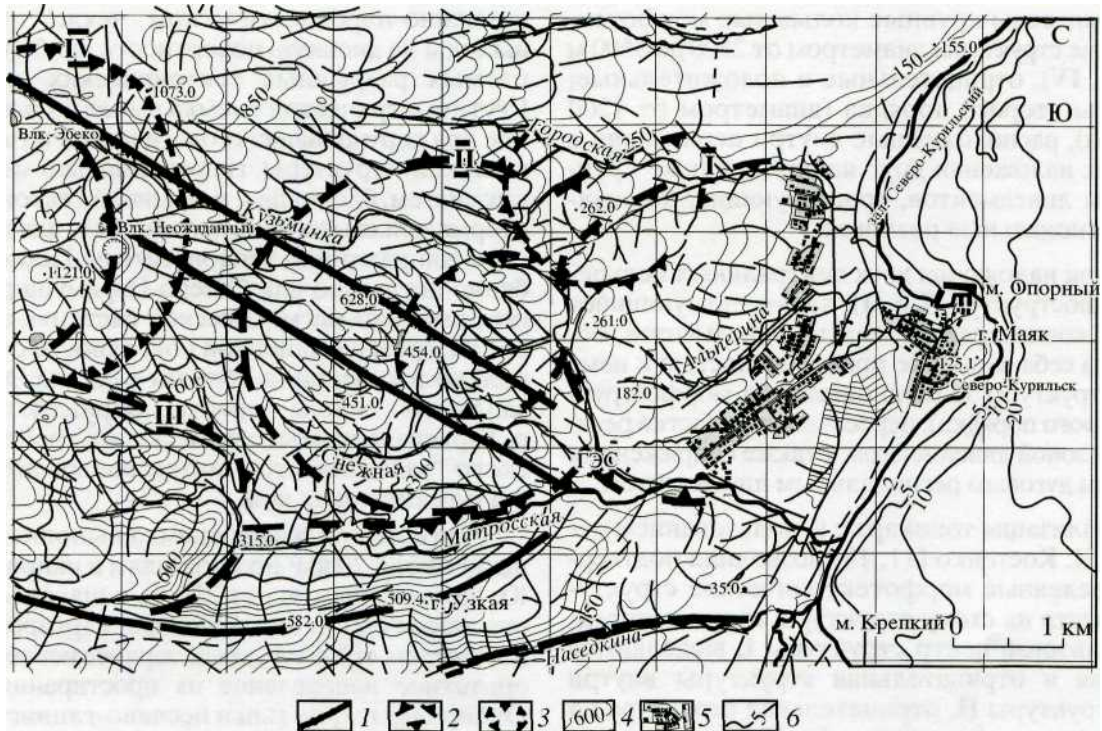


Рис. 2. Морфотектоническая структура Северо-Курильского геотермального месторождения: 1 - региональные ли-неаменты; 2 - морфотектонические купольно-кольцевые (положительные) структуры; 3 - морфотектонические отрицательные структуры (депрессии); 4 - изолинии рельефа (относительные значения); 5 - городские постройки; 6 - изобаты. Римскими цифрами обозначены кольцевые структуры первого порядка (см. текст).

вует сохранению высоких термодинамических параметров в недрах гидротермальной системы.

В геологическом блоке, вскрытом глубокой скважиной ГП-3, в настоящее время происходит формирование эпitherмальной золото-полиметаллической минерализации (Au, Ag, Hg, Pb, Zn и др.) на геохимических барьерах в зоне кварц-адуляр-гидрослюдистых метасоматитов. К наиболее проницаемым участкам на глубине (литологическим границам пород, как правило, брекчированным и высокопористым) приурочены скопления самородных металлов (Fe, Cu, Zn, Pb, Sn и др.) и интерметаллических соединений, а также частиц графита, характеризующих восстановительные условия минералообразования. Таким образом, в опорном глубоком геологическом разрезе наблюдается привнос во вмещающие породы крем-некислоты, щелочных и ряда рудных химических элементов. Привнос осуществляется газогидротермальным флюидом из нижележащих горизонтов по открытым на глубину не менее 1.5-2.0 км зонам разломов. Формирование флюида происходит на уровне апикальной части субвулканического (интрузивного ?) тела андезито-базальтово-го состава или глубже.

Исходя из изложенного, Северо-Парамушир-ская гидротермально-магматическая система находится на прогрессивном этапе развития. В на-

стоящее время, вероятно, происходит дальнейший разогрев вмещающего ее крупного блока магматических и вулканогенно-осадочных пород. Существует прямая связь между гидротермальной и магматической конвективными ячейками системы, выраженная в обмене между ними теплом и веществом в виде газов, горячих и холодных растворов, минеральных рудных и других соединений.

Дешифрирование топокарт, морфотектонический анализ. С помощью методов дешифрирования топоизображений и геоморфологического анализа, широко используемых для предварительного выделения и характеристики современных и неотектонических геологических структур, построена морфотектоническая карта-схема Северо-Курильского геотермального месторождения (рис. 2). На схеме вынесены все типы ли-неаментов (кольцевые, линейные), трассирующие зоны современных тектонических нарушений или отдельные разрывные тектонические нарушения. Новейшая разрывная тектоника на вулканогенных площадях и гидротермальных системах отражается на дневной поверхности за счет проявления эрозийной сети водотоков. Определенный рисунок выделенных ли-неаментов, их сгущения и разряжения, позволяют нанести на карту основные морфотектонические структуры и локализовать четко выраженные мелкие структуры. Таким об-

разом, выделены крупные кольцевые морфотек-тонические структуры диаметром от 2500 до 3500 м (I, II, III, IV), отрицательные и положительные; структуры второго порядка (диаметром от 1200 до 1500 м), расположенные внутри первых или в местах их наложения друг на друга; также крупные зоны линеаментов, трассирующие, по-видимому, региональные разломы.

Участок наложения двух центральных кольцевых морфоструктур (I и II), характеризующийся большой концентрацией мелких линеаментов, обращает на себя внимание приуроченностью к нему центра структуры II (отрицательной морфоструктуры второго порядка), пересечением участка региональной зоной линеаментов, а также сопряжением с крупным дуговым региональным линеаментом.

Генерализация топокарт с использованием методик Н.П. Костенко [11, 19] позволила подтвердить выделенные морфотектонические структуры и нанести на схему структуры второго порядка: локализован центр структуры I, выделяются купольная и отрицательная структуры внутри морфоструктуры II, отрицательная структура на пересечении морфоструктур I и II, а также региональная секущая зона в виде полосы линеаментов шириной 600 м юго-восточного простирания (от вулкана Эбеко к слиянию рек Кузьминки и Матросской).

Ртутнометрическая съемка. Ртуть относится к подвижным химическим элементам при высокотемпературных гидротермальных процессах. Считается, что ртуть в современных гидротермальных системах отгоняется из прогретых недр систем и накапливается в аргиллизированных породах вблизи дневной поверхности [27]. Мигрирует ртуть, находясь в атомарном состоянии, по трещинам в пределах наиболее проницаемых, "открытых", тектонических нарушений. Соответственно аномалии относительно высоких содержаний Hg трассируют термоподводящие разломы в пределах наиболее прогретых участков геотермальных полей или над горячими магматическими телами. В связи с отмеченными особенностями миграции ртути изучение ее распределения в породах, почвах, гидротермальных осадках используется для картирования проницаемых тектонических зон. Так, изучение распределения Hg в почвах Йелло-устонского национального парка (США) позволило оконтурить зоны наиболее интенсивного выделения пара [34]. Картирование геологических структур на геотермальных месторождениях Океанское (о-в Итуруп) и Паужетское (Камчатка) с помощью ртутнометрической съемки дало возможность выделить и проследить границы тектонических блоков и проницаемые разрывные нарушения, контролируемые восходящий поток парогидро-терм, на дневной поверхности и до глубин 1000—1200 м [19, 23]. Таким образом, аномалии ртути в

почвенно-пирокластическом чехле трассируют выходы на дневную поверхность наиболее проницаемых разрывных тектонических нарушений. Ртутнометрическая съемка имеет большое значение для картирования геологической и гидрогеологической структуры гидротермально-магматических систем, блоковой и разрывной тектоники на геотермальных месторождениях, в т.ч. для поиска зон скрытой разгрузки теплоносителя. Последнее особенно актуально для Северо-Парамуширской гидротермально-магматической системы, где тепловая разгрузка на дневной поверхности отмечается только в кратерной области вулкана Эбеко и на западном склоне хребта Вернадского вдоль р. Юрьева, а на восточном склоне хребта Вернадского "задавливается" интенсивным потоком ин-фильтрационных вод.

Ртутнометрическая съемка выполнена на площади около 20 км² по профилям в направлении С-Ю, заложенным через 250 м, с шагом опробования также 250 м, что важно для картирования геологических структур, когда заранее неизвестно приоритетное направление их простирания (рис. 3). Отбирался глинистый и песчано-глинистый материал из подпочвенного горизонта на глубине от 20 до 50 см. По центральному профилю пробы отобраны через 125 м с целью уточнения строения ртутнометрических аномалий, методического контроля работ и заверки проницаемых тектонических нарушений в более крупном масштабе. Вес проб составил, в зависимости от плотности материала, 0.5-1.0 кг. После отбора пробы были высушены в помещении при температурах от 15 до 35°C и просеяны через набор бронзовых сит. На Hg анализировалась фракция 0.1-0.28 мм. Определение содержания ртути выполнено в Институте вулканологии ДВО РАН д.г.-м.н. И.И. Степановым на атомно-флюоресцентном фотометре "Меркурий-3М". Предел обнаружения Hg - $5 \times 10^{-7}\%$ (5ppb).

Разброс значений содержания ртути составляет от 10 до 350 ppb, при фоновых концентрациях в Курило-Камчатском регионе 10-25 ppb [9]. Распределение концентраций ртути в почвенно-пирокластическом чехле на площади исследований достаточно контрастно: участки с усредненными аномально высокими содержаниями Hg группируются в протяженные линейные или изометричные зоны. Эти участки приурочены к местам пересечения или сопряжения морфотектонических структур, трассируют их границы, а также отдельные линеаменты. Представляет повышенный интерес зона сопряжения (пересечения) двух основных крупных кольцевых структур (I и II): район среднего течения рек Снежной, Кузьминки, Городской. Выделяются: зона регионального тектонического нарушения юго-восточного простирания шириной до 600 м, купольно-кольцевая структура диаметром около 2 км в среднем тече-

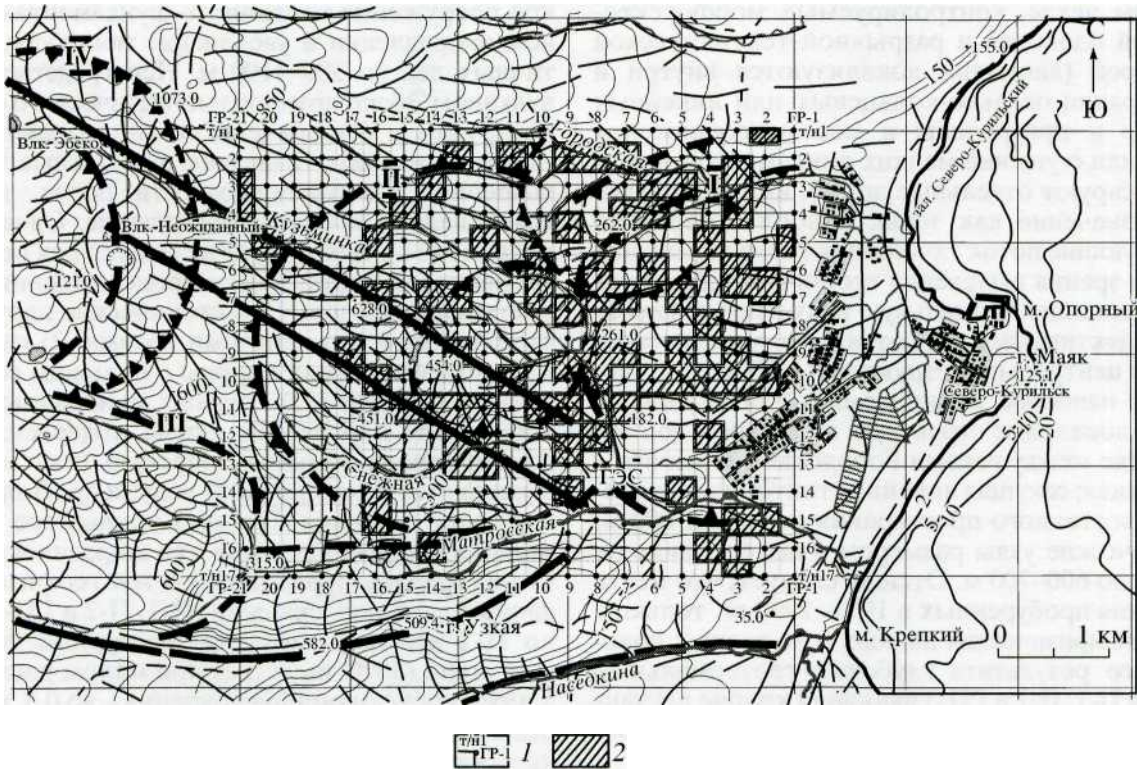


Рис. 3. Распределение ртутнометрических аномалий в пределах Северо-Курильского геотермального месторождения и морфотектоническая структура участка: 1 - квадратная сеть ртутнометрического опробования: номера профилей и точки отбора проб; 2 - усредненные аномалии относительно высоких значений содержания ртути в почвенно-пиро-кластическом чехле. Остальные обозн. - см. рис. 2.

нии р. Городской и отрицательная овално-кольцевая структура поперечником 2 км в междуречье Кузьминки и Снежной, а также другие отдельные мелкие морфоструктуры или сгущения линеаментов. По-видимому, такие морфотектонические структуры связаны с глубинными современными тектоническими зонами и контролируют их положение на дневной поверхности. Кроме отмеченных морфотектонических структур на карте-схеме (рис. 3) выделяется крупная изометричная область размером в поперечнике 2500-3000 м с расположением аномалий ртути по границе и внутри. Область наложена на участок пересечения двух крупных морфотектонических структур I и II и региональную линейную зону юго-восточного простирания, т.е. перекрывает наиболее сложный в тектоническом отношении участок. Вследствие того, что, как отмечалось выше, ртуть имеет свойство подниматься из глубоких прогретых горизонтов и трассировать открытые на значительную глубину разрывные нарушения, выделенная область должна отражать изометричную в плане геологическую структуру диаметром 2500-3000 м, корни которой находятся на глубине $\geq 2.5-3.0$ км. Поэтому мы полагаем, что расположенные в пределах выделенной области морфо-тектонические образования являются наиболее

перспективными для целей картирования термо-выводящих каналов.

Обсуждение результатов морфотектонического анализа и ртутнометрической съемки. На территории Северо-Курильского геотермального месторождения выделена система блоковых овално-кольцевых и линейных морфотектонических структур, имеющих размеры 1200-1500 и 2500-3000 м в диаметре (изометричные структуры двух порядков) и до 600 м в поперечнике (протяженные линейные). Показаны отрицательные и положительные морфотектонические структуры (современные депрессии и поднятия), падение границ которых на глубину предположительно составляет от 45 до 90°. За счет наложения друг на друга структуры образуют наиболее напряженный тектонический узел в центре и северо-восточной части Северо-Курильского геотермального месторождения (рис. 3). Показана также сеть мелких линеаментов, концентрирующихся на отдельных участках, в основном приуроченных к пересечениям крупных структур. Установлено дискретное распределение ртути в почвенно-пиро-кластическом чехле на площади около 20 км². Содержание Hg колеблется в пределах 10-350 ppb, в среднем от 20-30 до 120-140 ppb. Участки повышенных концентраций Hg в почвенно-пиро-клас-

тическом чехле, контролируемые морфотекто-нической блоковой и разрывной тектонической структурой (аномалии локализуются внутри и вдоль границ овално-кольцевых или линейных структур и приурочены к местам сопряжения блоков или сгущений мелких линеаментов, а также трассируют отдельные зоны), имеют практическое значение как зоны, наиболее вероятно трассирующие поток глубинных термальных вод. С точки зрения выделения геологических структур, вмещающих термальную воду и пар на глубине, перспективными являются: участок пересечения двух центральных структур (I и II), как, по-видимому, наиболее проницаемый для теплового потока; локальные структуры диаметром до 2 км на участке между реками Городская - Снежная - Матросская; секущая линейная тектоническая зона юго-восточного простирания шириной 600 м; тектонические узлы размером в поперечнике от 250-300 до 600-700 м. Отсюда следует, что места заложения пробуренных в 1991-1996 гг. только с учетом геофизических данных и не давших практического результата глубоких геотермальных скважин П-1, П-2 и ГП-3 выбраны крайне неудачно (рис. 3). Этот факт подтверждается и другими материалами [2, 21].

Таким образом, в результате морфоструктурных исследований и ртутнометрической съемки создана основа для выбора наиболее перспективных структур с целью крупномасштабного (от 1:10000 до 1:2000) картирования термоподводящих разломов и подготовки геотермальной площади к разведочному бурению.

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ СЕВЕРО-КУРИЛЬСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ПРОЯВЛЕНИЯ ПО МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Геофизические исследования на о. Парамушир. Для изучения глубинного строения вулкана Эбеко и Северо-Парамуширского геотермального района с 1960 по 1993 г. проведены гравиметрические, магнитометрические, радиометрические и электроразведочные работы [3,5]. В районе центрального конуса вулкана установлена отрицательная аномалия силы тяжести, что объясняется малой плотностью гидротермально измененных пород, образующих вертикальное цилиндрическое тело овального сечения размером 2 x 1 км. Положительные аномалии силы тяжести связывались исследователями с субвулканическими телами, характерным из которых представляется плато Аэродромное. На восточном склоне вулкана Эбеко зафиксировано почти горизонтальное положение третичных отложений и плавное уменьшение мощности четвертичных вулканических пород от 600 м до нуля в направлении тихоокеанского побережья. На западном склоне установлено рез-

кое погружение третичного фундамента в западном направлении и увеличение мощности четвертичных лав до 500-1100 м. Непосредственно под вулканом Эбеко крупного магматического очага не обнаружено. Установлены низкие значения радиоактивности пород. Выделены аномальные зоны повышенной электропроводности пород, которые трактовались как термоподводящие. Однако, как правило [31], существует не менее трех основных вариантов интерпретации происхождения электропроводящих зон: 1) тектонические нарушения, заполненные термальными водами; 2) гидротермально измененные породы с большим содержанием сульфидов и др. рудных минералов; 3) тектонические нарушения, линзы, содержащие высокоминерализованную морскую (как правило, смешанную с термальной) воду; и др. В практике изучения строения Северо-Курильского геотермального месторождения это выразилось в том, что из трех пробуренных с учетом геофизических данных глубоких скважин (П-1, П-2 и ГП-3) только П-2 вскрыла низкотемпературные термальные воды (80°C на устье) при малом расходе (от 5 л/сек после окончания бурения - до 0.8 л/сек через 4 года, вследствие зарастания ствола скважины карбонатами). Данный факт свидетельствует о сложном строении Северо-Парамуширской гидротермально-магматической системы и о недостаточности только геофизических исследований. Для понимания геотермальных и гидротермальных рудо-образующих процессов необходимы детальные комплексные геолого-геофизические и геохимические исследования.

Метод магнитометрических исследований традиционно сопровождает или опережает геолого-геохимические изыскания. При изучении камчатских месторождений парогидротерм надежность магнитометрических методов доказана в использовании их в комплексе с геологическими и гидрогеологическими работами для выделения зон измененных пород и тектонических нарушений, обнаружения интрузивных тел, перекрытых осадочным чехлом. Ожидаемая высокая результативность магнитометрического метода основана также на том, что изучаемый геологический разрез сложен породами, обладающими различной намагниченностью (например, андезито-ба-зальты - кварц-адуляровые метасоматиты [21]), геологические тела могут иметь большую протяженность и мощность; в среде присутствуют крутонаклонные границы разделов, тектонические нарушения, зоны брекчирования.

Методика магнитометрических исследований. Для изучения магнитного поля на площади исследований использовался прибор ММП-203, действие которого основано на принципе свободной ядерной прецессии протонов. ММП-203 предназначен для измерения модуля индукции геомагнитного поля Земли. Указанный прибор применяется для



Рис. 4. Распределение магнитометрических аномалий в пределах Северо-Курильского геотермального месторождения и морфотектоническая структура участка.

выполнения наземных магниторазведочных работ средней точности в сложных геоморфологических и климатических условиях. Пешеходные магнитные измерения проводились на площади около 20 км² по квадратной сети с расстоянием между профилями и пунктами наблюдений, равным 250 м. Такая система наблюдений рациональна, так как размеры изучаемых геологических объектов составляют в поперечнике от нескольких сотен до тысяч метров, поэтому основные структуры и их границы выделяются уверенно. Наземная магнитометрическая съемка относится к профильной с полуинструментальной разбивкой сети наблюдений (использовался теодолит Т-30М).

Измерение модуля индукции магнитного поля производилось по методике замкнутых рейсов с повторными наблюдениями в контрольных точках. На каждом пункте наблюдений производилось по 3-9 измерений при ориентации магнитометрического преобразователя в плоскости магнитного меридиана. На участках с высоким градиентом поля и перспективных на термальные воды производилось сгущение точек наблюдений. Повторные наблюдения составили около 30% от их общего числа. Продолжительность рейса между контрольными точками не превышала полутора часов, а специальные режимные наблюдения на ряде опорных точек за суточными вариациями магнитного поля показали, что их величина не превышает 40 нТл. Измерения на контрольных точках сети производились не менее

двух раз в день. Вариации магнитного поля на контрольных точках ежедневно увязывались с его изменениями на базовом контрольном пункте. Точность измерений составила 10-30 нТл, что удовлетворяет требованиям магнитометрической съемки средней точности.

Распределение параметров магнитного поля пород на площади Северо-Курильского геотермального месторождения. Магнитное поле участка съемки можно разделить по степени неоднородности на 4 сектора: Восточный, Западный (Северо-Западный), Центральный и Южный (рис. 4). *Восточный сектор* характеризуется в целом спокойным полем средних значений. В северной части этого сектора и геотермального месторождения выделяется концентрическая структура, состоящая из отрицательной аномалии в центре (ПР-5, т/н 4) и обрамления из аномалий положительного знака разной интенсивности. Суммарная величина изменения интенсивности поля в указанной структуре достигает 2800 нТл. В средней части Восточного сектора также выделяется кольцевая структура, только обратного знака: в центре (ПР-4, т/н 9) наблюдается положительная аномалия, по краям - цепочка дугообразных отрицательных аномалий. *Магнитное поле Западного сектора* является наиболее сложным. В южной части сектора выделяется крупная сложная концентрическая аномалия, обрамленная дугообразными аномалиями разного знака и амплитуд. Средняя часть сектора представляет собой поло-

жительную аномалию высокой амплитуды (ПР-15, т/н 8). В Центральном секторе расположена аномалия магнитного поля с максимальной для всей площади съемки амплитудой отрицательного знака - более 3000 нТл. Внешнее кольцо структуры представлено большей частью аномалиями положительного знака с амплитудой от 1100 до 1700 нТл. С севера эта центральная концентрическая структура ограничена дугообразной отрицательной аномалией с амплитудами, достигающими значений 1750 нТл. Южная часть всего Северо-Курильского участка характеризуется в целом слабоконтрастным магнитным полем.

Выделение геологических блоков и проницаемых тектонических структур. Интерпретация характера и распределения значений магнитного поля дает возможность сделать выводы о составе пород и происхождении геологических тел, расположенных на глубине до нескольких сотен метров от современной дневной поверхности. Площадь магнитометрической съемки перекрыта чехлом из рыхлых отложений небольшой толщины и современными лавовыми потоками мощностью ≥ 100 м, под которыми располагается неоднородная по составу и строению толща (неогеновый вулканогенно-осадочный фундамент). В соответствии с амплитудами, знаками и площадным распределением магнитных аномалий верхняя граница толщи представляет собой поверхность, имеющую резкие перегибы и различные гипсометрические уровни отдельных своих участков. Это свидетельствует в пользу блокового строения самой толщи. Блоки смещены с различной амплитудой друг относительно друга по субвертикальным разломам. Отдельные аномалии поля можно интерпретировать как интрузивные тела или гидротермально измененные породы, расположенные на некоторой глубине от дневной поверхности. *Восточный сектор*, выделенный в магнитометрическую структуру первого порядка, представляется системой трех сопряженных геологических блоков, разделенных зонами трещиноватости с развитыми по этим зонам гидротермально измененными породами. *Верхняя граница центрального блока* залегает на глубине ≤ 180 метров. С севера и юга блок ограничен разломными зонами, совпадающими с долинами рек Городской и Матросской. Указанные тектонические нарушения картируются отрицательными аномалиями поля различной интенсивности и формы. *Северная аномалия* в долине р. Городской имеет глубину залегания кромки образующего ее тела ≤ 210 м. По-видимому, данное тело представлено гидротермально измененными породами, о чем свидетельствуют выходы пород на этом участке долины реки. *Южная отрицательная аномалия* субширотного простирания может интерпретироваться как плоское тело с тем же простиранием, залегающее на глубине 115-145 м. Вероятнее всего, тело представлено вул-

каногенно-осадочными породами неогенового фундамента, вмещающими минерализованные низкотемпературные термальные воды. Эти воды вскрыты в долине реки Наседкина на глубине ≤ 60 м при производстве поисковых работ на пресные воды³.

По нашим представлениям, эта область гидротермальной системы является зоной растекания смешанных сульфатно-хлоридных термальных вод [2].

Таким образом, наблюдаемое магнитное поле на площади Северо-Курильского геотермального месторождения характеризует строение кровли пород неогенового фундамента, фиксирует положение тел андезитобазальтового состава и зон повышенной трещиноватости, вмещающих гидротермально измененные породы и (или) минерализованные термальные воды. Отрицательные аномалии поля соответствуют зонам распространения гидротермально измененных пород и термоконтролирующим тектоническим нарушениям. Положительные аномалии указывают на присутствие под четвертичными отложениями протяженных или изометричных субвулканических тел, а также массивных лавовых потоков андезитобазальтового состава, даек и некков высокомагнитных пород.

Гидрохимическая структура Северо-Курильского геотермального месторождения. Химический состав гидротерм является одним из факторов, от которого зависит протекание гидротермальных процессов, в т.ч.: смешение высоко- и низкотемпературных вод, растворимость газов, эволюция зон перехода жидкость-пар, создание геохимических барьеров и дополнительных водоупоров или проницаемых горизонтов и др. Таким образом, химический состав гидротерм во многом влияет и на формирование геологической структуры гидротермально-магматических систем. В северной части о. Парамушир состав природных вод изучался в основном в связи с наблюдением за вулканическим Эбеко [7, 16, 28], а также такими частными задачами, как поиски пресных вод, удовлетворяющих требованиям технического и питьевого водоснабжения. Нашими работами начался новый этап в изучении всех типов гидротермальных растворов, участвующих в эволюции длительноживущей Северо-Парамуширской гидротермально-магматической конвективной системы. Район Северо-Курильского геотермального месторождения, так же как и бассейн р. Юрьева, выделяется значениями основных гидрохимических показателей: относительно низкими рН, повышенными значениями хлор-иона и сульфат-иона в водах,

Заклучение о результатах бурения разведочно-эксплуатационных скважин для хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Северо-Курильска в 1984-1988 гг. Отчет. Южно-Сахалинск, 1988. Фонды Сахалинской гидрогеологической экспедиции.

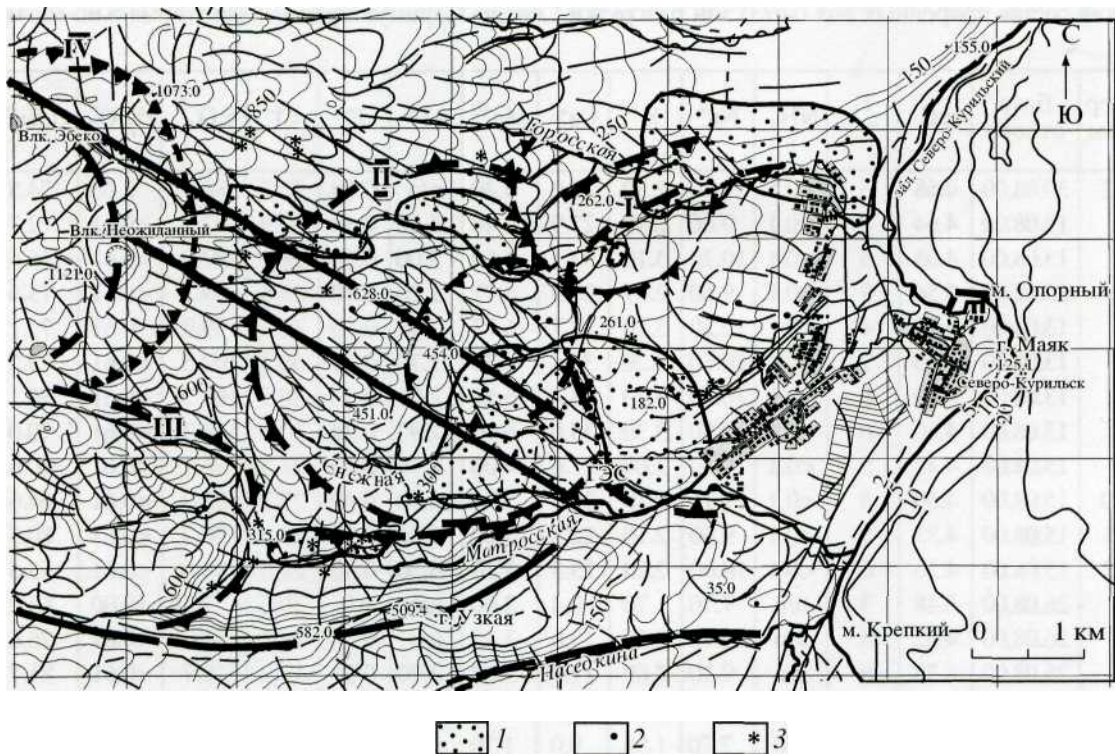


Рис. 5. Карта-схема распределения аномалий относительно высоких значений содержания анионов в природных водах Северо-Курильского геотермального месторождения: 1 - аномалии повышенных значений анионов в природных водах; 2 - точки отбора гидрохимических проб; 3 - то же, с температурой воды более 10°C.

что свидетельствует о влиянии глубинных гидротерм на формирование химического состава разгружающихся на дневной поверхности вод. В то же время на площади исследований отсутствуют явные признаки разгрузки термальных вод. Установлению причин этого "парадокса" и посвящен настоящий раздел статьи.

Методика гидрохимических исследований. Пробы воды отбирались в меженный период (август-сентябрь) из всех выявленных источников природных вод, разгружающихся на дневной поверхности, в пластиковые бутылки объемом 1.5 л с отжатием видимых пузырьков воздуха. При этом измерялись рН, температура воды с точностью до 0.5°C и делалось стандартное гидрогеологическое описание места отбора пробы. Анализ вод на макрокомпоненты выполнен в химической лаборатории ИВ ДВО РАН (Аттестат аккредитации Госстандарта России № РОСС RU.0001.511904 от 21.09.1999 г.). Анионы и катионы определялись общепринятыми методами [18] на приборах: ио-номер универсальный ЭВ-74, иономер И-130, атомно-абсорбционный спектрофотометр РУЕ UNICAM, Spekol 211. Результаты химического анализа вод приведены в таблице. Равномерное опробование позволило дать подробную гидрохимическую характеристику участка (рис. 5).

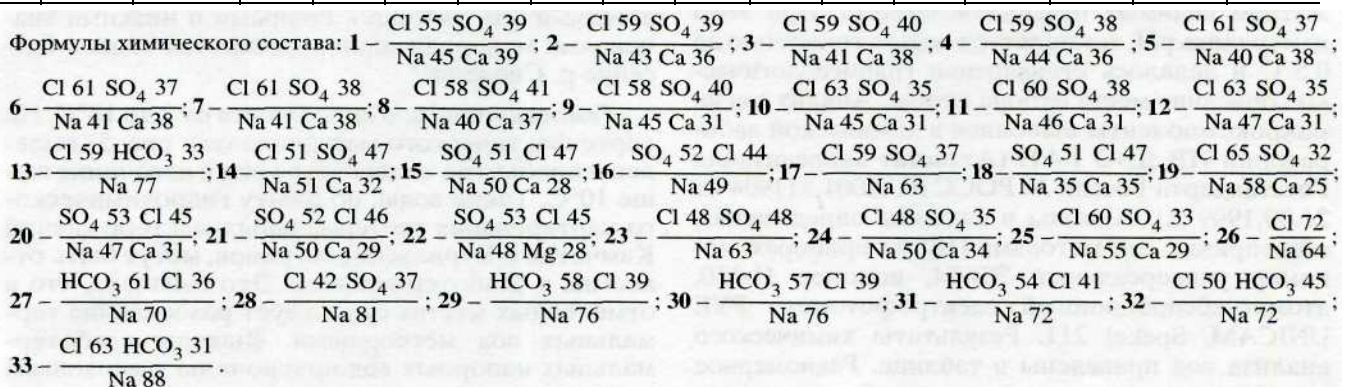
Характеристика природных вод. В данном разделе приводится характеристика грунтовых и, в основном, подземных (напорных) вод, разделение которых было не всегда возможно.

Минерализация вод, в целом, низкая и составляет 0.01-0.5 г/л. Воды с относительно высокой общей минерализацией (0.2-0.5 г/л) разгружаются в нижнем и верхнем течении р. Кузьминки. Выделяются отдельные участки с выходами подземных вод в нижней и средней части долины р. Городской (Г-8-11, Г-23, 25) и единичные источники в долине р. Матросской (М-2, 10). Указанные источники отличаются и гидрохимическими показателями (см. таблицу). Ровными и низкими значениями минерализации выделяются воды в бассейне р. Снежной.

Температуры вод колеблются от 2 до 18°C. На карте фактического материала (см. рис. 5) выделены пробы, где температура вод в источнике выше 10°C. Такие воды, по опыту гидрохимического картирования геотермальных месторождений Камчатки и Курильских островов, могут быть отнесены к слаботермальным. Это означает, что в отмеченных местах существует разбавление термальных вод метеорными. Выходы слаботермальных напорных вод приурочены к верховьям р. Кузьминки, верховьям и среднему течению рек Матросской, Альперина, и двум участкам на

Химический состав природных вод (мг/л) зон разгрузки Северо-Парамуширской гидротермально-магматической системы

№ п/п	Номер пробы	Дата отбора	pH	T, °C	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Al ⁺³	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	H ₄ SiO ₄	Минерализация, г/л
1	C-12	30.08.00	4.68	5	<0.1	9.30	2.30	28.0	4.40	н/о	0.08	22.7	86.4	3.66	74.5	0.232
2	K-1	13.08.00	4.64	8	<0.1	9.60	2.48	27.9	4.44	3.20	0.50	25.9	92.2	<0.61	72.7	0.241
3	K-2	13.08.00	4.65	6	<0.1	10.20	3,10	33.1	5.60	3.00	0.20	26.1	97.0	<0.61	66.6	0.247
4	K-3	13.08.00	4.56	8	<0.1	9.60	2.67	27.5	4.77	2.20	0.40	25.5	89.3	<0.61	73.4	0.237
5	K-4	13.08.00	4.84	4	<0.1	10.20	3.10	33.7	6.77	2.43	0.30	30.5	99.9	0.61	72.1	0.261
6	K-5	13.08.00	4.65	7	<0.1	10.60	3.20	34.4	6.30	2.70	0.30	30.9	102.5	<0.61	73.2	0.266
7	K-6	13.08.00	4.60	6	<0.1	10.60	3.20	34.4	6.50	2.20	0.30	30.5	103.7	<0.61	70.1	0.263
8	K-7	15.08.00	4.60	6	<0.1	10.80	3.30	35.0	6.90	2.97	0.30	30.5	115.3	<0.61	70.0	0.277
9	K-8	15.08.00	4.42	5	<0.1	9.10	2.00	21.6	4.00	5.90	0.30	25.5	96.1	<0.61	60.6	0.227
10	K-10	15.08.00	4.30	5	<0.1	9.10	2.10	21.7	3.90	6.80	0.40	27.7	85.0	<0.61	64.6	0.223
L1	K-11	15.08.00	4.33	5	<0.1	9.60	2.10	22.3	3.20	6.50	0.50	28.4	96.0	<0.61	80.5	0.251
12	K-12	15.08.00	4.36	6	<0.1	10.00	2.20	23.3	3.10	6.20	0.50	28.0	84.6	<0.61	65.6	0.225
13	Г-7	26.08.00	6.48	3	н/о	7.70	1.70	0.4	2.60	н/о	н/о	10.6	7.70	10.00	64.7	0.106
14	Г-8	26.08.00	4.62	5	н/о	9.10	2.50	19.6	3.45	н/о	0.30	14.2	71.0	<0.61	76.6	0.197
15	Г-9	26.08.00	4.32	6	н/о	9.10	2.60	17.9	3.83	2.70	0.20	13.2	78.7	<0.61	81.7	0.211
16	Г-11	9.08.00	4.65	5	н/о	9.00	2.50	15.5	5.70	2.40	0.40	12.0	76.8	<0.61	77.5	0.202
17	Г-14	4.08.00	4.68	4	н/о	7.70	1.98	9.0	1.70	н/о	0.30	11.3	38.0	<0.61	72.1	0.143
18	Г-17	4.08.00	3.70	11	<0.1	17.20	4.72	59.9	18.10	12.2	0.90	43.6	255.4	<0.61	97.3	0.512
19	Г-18	4.08.00	5.25	4	<0.1	8.00	2.10	12.0	2.40	н/о	0.30	15.6	42.30	<0.61	18.3	0.102
20	Г-23	9.08.00	4.69	5	н/о	9.00	2.50	16.2	5.00	2.70	0.30	12.0	76.8	<0.61	77.8	0.203
21	Г-25	7.08.00	5.10	6	н/о	9.10	2.60	18.2	5.10	н/о	0.20	12.1	73.0	<0.61	73.7	0.195
22	Г-26	7.08.00	4.93	6	н/о	9.10	2.60	8.5	11.10	1.90	0.20	12.1	76.8	<0.61	73.7	0.197
23	M-1	27.08.00	4.80	5.5	н/о	7.00	1.40	8.8	1.80	н/о	0.22	7.1	38.40	<0.61	47.3	0.113
24	M-2	27.08.00	5.22	14	н/о	8.60	1.90	20.2	3.30	н/о	0.10	15.6	61.50	9.80	41.9	0.163
25	M-3	27.08.00	5.45	4.5	н/о	7.50	1.50	14.0	2.70	н/о	0.10	12.8	38.40	2.20	38.4	0.118
26	M-6	27.08.00	5.87	12	н/о	0.30	0.09	0.2	<0.24	н/о	н/о	0.7	0.50	<0.61	4.2	0.007
27	M-8	31.08.00	6.90	11	н/о	5.90	1.80	3.4	1.10	н/о	н/о	6.4	2.90	18.30	41.9	0.082
28	M-13	31.08.00	5.90	16.5	н/о	1.00	0.20	<0.4	<0.24	н/о	н/о	<0.7	1.70	<0.61	6.0	0.011
29	A-1	5.08.00	6.70	8	<0.1	11.50	1.60	7.2	1.20	н/о	н/о	13.5	6.00	34.20	64.7	0.140
30	A-5	5.08.00	6.96	7	<0.1	10.80	1.50	7.2	1.20	н/о	н/о	12.1	7.70	30.50	64.7	0.140
31	A-6 ₁	5.08.00	6.40	5	<0.1	9.70	1.80	7.2	1.20	н/о	н/о	11.3	8.60	25.60	69.9	0.135
32	A-21	8.08.00	6.95	5	<0.1	9.00	1.50	7.2	1.20	н/о	н/о	14.2	6.80	22.0	60.2	0.122
33	A-27	26.08.00	6.02	11	<0.1	9.00	0.90	2.0	<0.24	н/о	н/о	12.8	6.80	10.70	29.1	0.072



Примечание: н/о- не определено. Анализы выполнены в химической лаборатории ИВ ДВО РАН, аналитики: С.В. Сергеева, В.К. Марынова, О.В. Шульга.

р. Городской. Некоторые из них отличаются и относительно высокой минерализацией вод. Особо выделяется источник в долине р. Правая Городская (Г-17). Здесь на дневную поверхность выходят наиболее минерализованные воды (0.5 г/л) с низким рН (3.7). Источник представляет интерес для постановки режимных гидрогеологических наблюдений.

Типы вод и их распределение. Выделяются следующие типы вод по анионному составу: хлоридно-сульфатный, сульфатный и гидрокарбонатно-хлоридный. Катионный состав более пестрый: кальций-натрий-калиевый. Преобладающими водами являются хлоридно-сульфатные (Cl-SO_4) сложного катионного состава. Распространены они по долине р. Кузьминки, в верховьях р. Городской и в нижней части р. Снежной. Большими расходами и повышенными концентрациями химических компонентов отмечаются источники, приуроченные к подошве лавовых потоков, обнажающихся в правом борту нижнего и среднего течения р. Кузьминки. В верховьях реки в грунтовых и напорных водах наблюдаются повышенные концентрации Mg относительно общего фона. Водородный показатель этого типа вод кислый, слабокислый или близнеутральный, диапазон температур от 5 до 17°C. Воды хлоридно-сульфатного типа образуются за счет смешения поверхностных метеорных и грунтовых вод с глубинными термами. Таким образом, аномалии повышенных концентраций хлор- (до 70 мг/л) и сульфат-иона (до 255 мг/л) в природных водах фиксируют выходы на дневную поверхность термоподводящих каналов. Менее распространены кальций-натрий-сульфатные ($\text{SO}_4\text{-Ca(Na)}$) воды с низкими концентрациями хлора ($\leq 12\text{-}15$ мг/л). Воды этого типа наиболее минерализованные, разгружаются в виде одиночных источников или вдоль пластов пород (туффи-тов, ледниковых отложений или потоков лав). Водородный показатель вод кислый или слабокислый. В большинстве источников температуры вод составляют 10-13°C. Вероятно, эти источники также находятся над термоподводящими зонами, перекрытыми рыхлыми или вулканогенными отложениями. Гидрокарбонатно-кальциевые воды

($\text{HCO}_3\text{-Ca}$) имеют близнеутральный водородный показатель и средние температуры (6-8°C); распространены локально, в основном в районе р. Альпе-рина. Наличие хлора в водах (до 14.2 мг/л) объясняется, по-видимому, проникновением в эту часть системы морских вод. Морские воды фильтруются в структуре Северо-Парамуширской гидротермально-магматической системы на значительную глубину (более 2.5 км) и далеко вглубь острова [21].

Водородный показатель (рН). Воды с рН от 2 до 4 ед. (кислые) разгружаются в виде протяженных линз-полос в верховьях р. Кузьминки или отдельных выходов ближе к ее устью, в средней части долины р. Городской в районе "минерального

источника", а также в бассейне р. Матросской. Нейтральные воды (рН 6-7) приурочены к району г. Северо-Курильска, что свидетельствует об ослаблении здесь влияния кислых латеральных водных потоков, стекающих с вершинной части хребта Вернадского или поднимающихся в зоне восходящих глубинных растворов. Вероятнее всего, грунтовые и напорные малоглубинные воды на этой территории образуются за счет смешения на фронте двух потоков, принципиально отличающихся друг от друга: вод "вулканогенного происхождения" и метеорных, накапливающихся на ближайшей площади, с подмешиванием морских вод, несколько увеличивающих минерализацию. Наличие в районе города нейтральных слабоминерализованных низкотемпературных грунтовых вод свидетельствует о перспективе этого участка на обнаружение неглубоко залегающих вод, пригодных для технического или питьевого снабжения.

Распределение кремниевой кислоты (H_4SiO_4) в водах на территории Северо-Курильского месторождения, в целом, повторяет рисунок поля с аномально высокими концентрациями сульфат- и хлор-ионов: выделяются те же участки изометричной или слегка вытянутой формы. Поскольку повышенное содержание кремниевой кислоты типично для вод глубинного формирования, характеризующиеся в пределах аномалий формируются под влиянием глубинных терм. Эта информация подтверждается нашими данными по скважине ГП-3: здесь вскрыта мощная толща туфов и туффитов, в пределах которой происходит интенсивное высаживание коллоидного кремнезема за счет кипения высокотемпературных ($> 150\text{--}200^\circ\text{C}$) растворов в интервале глубин от 1.5 км - до верхнего водоупора (окремненных туффитов и гидротермально неизмененных массивных андезитов, залегающих на интервале разреза 700-150 м [21]).

Контроль распределения вод морфотектоническими структурами. Совмещение морфотектонической основы с распределением типов природных вод на данной территории позволяет сделать следующие обобщения. Области разгрузки напорных сульфатно-хлоридных вод приурочены к основному тектоническому узлу: пересечению структур I и II, и, в целом, контролируются этими структурами (рис. 5). Представляет интерес аномальная зона в верховьях р. Матросской, локализованная также на тектонически напряженном участке - пересечении кольцевых структур II и III и линейных региональных линейментов. Перспективна зона разгрузки вод между структурами II и IV. Здесь наиболее вероятно влияние мощных зон кипения гидротерм на формирование напорных вод, верхним водоупором для которых служат потоки лав андезитового состава четвертичного возраста, практически перекрывающие всю исследуемую территорию. На гипсометричес-

ких отметках 150-300 м (северная - северо-восточная граница структуры I) разгружаются слаботермальные и наиболее высокоминерализованные растворы с низкими значениями рН. Эти воды являются напорными и поступают к дневной поверхности на фронте потока глубинных хлоридно-натриевых и хлоридно-сульфатных терм. Выходы их на дневную поверхность отмечают зоны повышенной проницаемости, которые, вероятно, имеют крутое падение на глубину и контролируются границами геологических блоков и тектоническими узлами. В то же время, разгрузка подземных вод происходит и по пологопадающим структурным поверхностям - проницаемым лито-логическим границам, подошвам лавовых потоков, а также слабо наклонным тектоническим нарушениям; наиболее отчетливо она проявляется в зоне латерального потока на периферии гидротермально-магматической системы или на границе крупных геологических структур. Таким образом, геолого-гидрогеологические данные свидетельствуют о том, что основную термоподводящую роль играют субвертикальные разрывные тектонические зоны, которые в приповерхностных горизонтах объединяются с субгоризонтальными тектоническими нарушениями в единую систему потока терм и метеорных вод.

Картирование структуры геотермального месторождения с помощью водородной и радоновой съемки. Для формирования гидротермальных систем большое значение имеет циркуляция по зонам трещиноватости вулканических (магматических) и гидротермальных газов. Этот факт широко используется во всем мире в научных и практических целях при изучении вулканов и геотермальных месторождений с целью картирования геологической структуры объектов и поиска термоаномалий на глубине. Одним из наиболее апробированных методов является определение содержаний радона и водорода в газе почвенно-пирокластического чехла на глубине 0.8-1 м от дневной поверхности. При этом для выделения геологических блоков, зон повышенной проницаемости и термоаномалий на некоторой глубине предпочтительна площадная съемка с равным шагом опробования.

Опыт использования радоновой и водородной съемки на геотермальных месторождениях. Изучение поведения радона и водорода в почвенно-пирокластическом чехле в районах современного вулканизма проводилось с целью прогноза извержений вулканов и землетрясений. В последние годы получило развитие исследование распределения радона и водорода в пределах гидротермальных систем для выявления зон парообразования и термоконтролирующих разломов [35]. Получены физические характеристики конкретных зон разрывных тектонических нарушений путем измерения концентраций радона в течение нескольких лет

в почвенно-пирокластическом чехле на геотермальном поле в кальдере Асо (Япония) [32, 33].

Ранее нами проведено изучение уровней концентраций и распределения радона в почвенно-пирокластическом чехле в кратерной области вулкана Эбеко на площади 4 км² и сделано несколько профилей через всю постройку гидротермально-магматической системы - от г. Севе-ро-Курильска до устья р. Юрьева [10]. Одновременно измерялись температуры грунтов, а также уровень альфа- и гамма-активности пород. Установлено, что все полученные параметры коррелируют друг с другом. Аномалии высоких значений расположены в пределах зон, контролирующих фу-маролы и термальные источники. Аналогичные результаты получены в районе вулкана Богдановича (отметка 1072, верховья р. Птичьей). В бассейне р. Юрьева газовые аномалии приурочены к аргил-лизированным породам и характеризуют участки, наиболее прогретые и проницаемые на значительную глубину. Приуроченность аномалий радона к скрытым термальным проявлениям отмечается в устье рч. Утесный.

Фактический материал. Интерпретация данных.

Методика измерения содержаний радона и водорода в почвенно-пирокластическом чехле, использованные приборы и оборудование, другие технические условия - стандартны [10]. Измерения содержаний газов выполнены на площади ~10 км², непосредственно прилегающей к г. Северо-Курильску, в масштабе 1:25000 (рис. 6). По центральному профилю сделаны сгущения точек измерения содержания газов для уточнения структуры предполагаемых аномальных зон и для контрольных измерений. Концентрации радона на данной территории в рыхлых отложениях на глубине 0.8-1.0 м составляют от 1 до 360 Бк/м³, значения содержаний контрастны. Участки с относительно высокими значениями радона (выше 80 Бк/м³) образуют аномальные зоны (рис. 6). Наиболее контрастная аномалия приурочена к среднему течению р. Городской - участку разгрузки наиболее минерализованных слаботермальных напорных вод. Аномалии высоких содержаний водорода (>30-50 ppm) образуют полосы северозападного простирания, трассирующие проявленные на дневной поверхности или скрытые тектонические нарушения. Сопоставление результатов газо-геохимической съемки с морфотектонической основой (рис. 6) дает основание утверждать, что размещение аномалий повышенных содержаний радона и водорода в почвенно-пирокластическом чехле на данной площади не случайно, а контролируется блоковой и разрывной тектоникой. Четко локализируются аномальные зоны в кольцевой морфотектонической структуре диаметром около 2 км в среднем течении р. Городской. В целом, выделяется зона сопряжения крупных структур I и II. Аномалиями повышенных концентраций

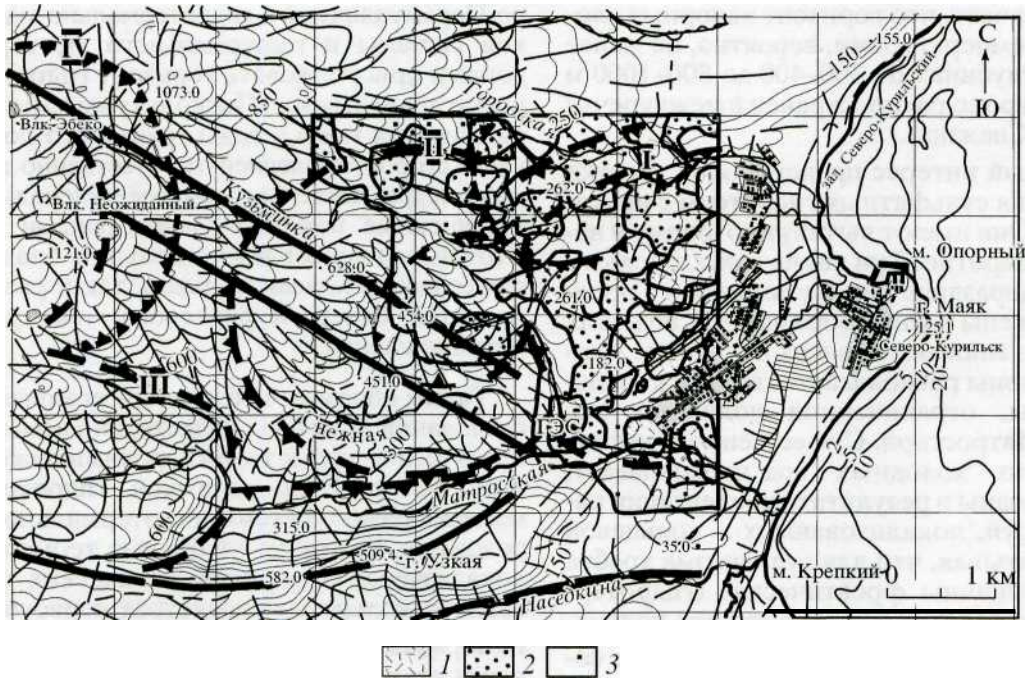


Рис. 6. Схема распределения аномалий относительно высоких содержаний радона и водорода в почвенном воздухе на площади Северо-Курильского геотермального месторождения, совмещенная с морфотектонической основой: 1 - аномалии повышенных концентраций водорода (>30-50 ppm); 2, 3 - то же, радона (2 - высокие значения, 3 - средние).

водорода трассируется зона тектонических нарушений, в пределах которой нами зафиксированы выходы напорных гидрокарбонатно-кальциевых вод (вдоль р. Альперина). Другая, параллельная первой и протяженная полоса повышенных концентраций водорода фиксирует положение на дневной поверхности скрытой зоны тектонических разрывных нарушений. Предположительно, эта зона несет туфо-алевролиты неогенового фундамента, но перекрыта толщей ледниковых и делювиальных отложений мощностью до нескольких десятков метров.

Таким образом, изучение распределения содержаний радона и водорода в почвенном газе на площади Северо-Курильского геотермального месторождения позволило подтвердить наличие части выделенных ранее морфотектонических блоков (кольцевая структура р. Городской) и определить новые, в т.ч. скрытые, разрывные тектонические нарушения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Концептуальная модель Северо-Курильского геотермального месторождения. Прикратерная зона вулкана Эбеко интерпретируется нами в качестве очага разгрузки восходящего потока паро-гидротерм типичной высоко-серной гидротермальной системы, Северо-Курильское геотермальное месторождение предварительно можно отнести к низкосерной гидротермальной обста-

новке [2]. Смешанный сульфатно-хлоридный состав большинства теплых и холодных источников свидетельствует о наличии двух водоносных комплексов. Верхний комплекс неглубокого формирования гидротерм существенно сульфатный и приурочен к вулканогенным отложениям четвертичного возраста. Основная масса этих терм метеорного происхождения. Термы насыщены растворенным кислородом. Напорные высокотемпературные хлоридные гидротермы, которые по разрывным тектоническим нарушениям под давлением поступают в верхний водоносный горизонт и образуют гидротермы гибридного химического состава, относятся к нижнему водоносному горизонту. Низкие температуры гидротерм в источниках и их химический состав служат, в большинстве случаев, доказательством высокой водообильности верхнего горизонта. Наличие интенсивных притоков из нижнего водоносного горизонта в верхний подтверждается изливом на дневную поверхность хлоридно-сульфатных кремнистых гидротерм, в частности, в районе р. Матросской (М-2.3 и др.). При изливе происходит отложение гейзеритов: растворенная кремнекислота не успевает (?) выпасть в осадок во время подъема гидротерм в дренирующем канале высокотрещиноватых и брекчированных пород. Отмеченные источники расположены между долинами рек Матросской и Снежной и являются сосредоточенной разгрузкой напорного потока гидротерм, экранируемого разломом или системой разнонаправленных раз-

ломов. Это означает, что горизонт напорных хлоридных вод с температурами, вероятно, не менее 150-200°C на глубинах от 300-400 до 800-1000 м может быть широко распространен в междуречье Матросской - Снежной.

Значительный интерес представляют участки распространения сульфатных гидротерм с низкими рН (3-3.5). Они имеют вытянутую форму и направлены субширотно. Три такие зоны, проявляющиеся на водоразделе рек Кузьминки и Городской, расположены кулисообразно; рН вод этих зон постепенно снижаются вверх по склону. Вершина верхней зоны располагается вблизи кольцевой структуры, ограниченной долинами рек Кузьминки и Матросской. Существенно сульфатный состав этих "холодных" вод предполагает, что они образованы в результате конденсации паро-газовых струй, локализованных в кольцевой структуре. Учитывая, что для вулканизма хребта Вернадского типичны фреатические (гидротермальные) взрывы, можно допустить, что кольцевая структура образована при участии таких событий. В результате последующих извержений вулканов Эбеко и Неожиданный лавовые потоки частично заполнили эту отрицательную кольцевую морфоструктуру. В лавах образуется мощный горизонт грунтовых вод, с которыми смешиваются восходящие парогидротермы. Предположительно, высокотемпературные хлоридные гидротермы, проходя через зону сульфатно-кислых вод, вскипают. Серные соединения окисляются при конденсации и участвуют в формировании слоя гидротермальных глин. Последний изолирует нижележащие высокотемпературные хлоридные гидротермы от верхнего горизонта грунтовых вод с сульфат-ионом. Кипение хлоридных и хлоридно-сульфатных терм с относительно высокими содержаниями кремнекислоты усиливает водоупорные свойства пород за счет отложения в них минералов кремнезема. Вероятно, таким образом формируются не только верхний, но и локальные водоупоры на различных горизонтах вблизи наиболее проницаемых структур. Наши материалы по глубокой скважине ГП-3 подтверждают эти выводы [21].

Судя по химическому составу вод из источников, бикарбонат присутствует в очень незначительных количествах (таблица). Но по данным изучения скважины П-2 известно, что ее расход уменьшается в связи с зарастанием ствола карбонатными отложениями. Последнее свидетельствует о присутствии в глубинных гидротермах значительных содержаний углекислого газа, который в восходящем потоке выделяется в свободную газовую фазу. Поэтому справедливо заключить, что на путях миграции глубинных гидротерм в латеральном потоке восточного склона хребта Вернадского происходит их дегазация и растворение углекислого газа в водообильном грунтовом потоке. В результате этого события в гидрохимической структуре Севе-

ро-Парамуширской гидротермально-магматической системы и геотермального месторождения должен присутствовать горизонт гидрокарбонатных углекислых вод. Поскольку масс-баланс при смешивании газов и воды грунтового потока смещен в сторону последней, то естественно допустить, что в недрах системы находятся минеральные газонасыщенные воды со значительными запасами. Этот вывод может иметь большое значение как для создания концептуальной, так и разведочной моделей Северо-Курильского геотермального месторождения.

Таким образом, в результате комплексных исследований получены качественно новые данные о геологической и газо-гидрохимической структуре Северо-Парамуширской гидротермально-магматической системы и геотермального месторождения. Разгрузка глубинных термальных вод локализуется в морфотектонических блоковых овально-кольцевых структурах первого и второго порядков, в местах пересечения их с региональными тектоническими зонами и в тектонических узлах - сгущениях мелких линейных элементов, как правило приуроченных к наложению более крупных структур. Наибольший интерес на данной территории представляют блоки первого порядка I и II и, в особенности, участок их наложения друг на друга, в пределах которого образованы кольцевые морфоструктуры второго порядка и на который наложена мощная региональная зона разрывных нарушений. Изучение территории комплексом методов позволило получить данные не только о близповерхностных, но и о глубинных геотермальных, в т.ч. минерало-рудобразующих, процессах.

Авторы признательны Н.А. Романковой, А.И. Кидяеву, Л.В. Котенко, Д.В. Мельникову и В.В. Угольцову за непосредственное участие в полевых исследованиях; В.К. Марыновой, С.В. Сергеевой и И.И. Степанову за большой объем выполненных аналитических работ; Ю.Д. Кузьмину за предоставление газогеохимического оборудования и консультации; Главному врачу Центра государственного санитарного эпидемиологического надзора Северо-Курильского района В.И. Саенко, предоставившему помещение и оборудование для выполнения химико-аналитических работ непосредственно на объекте; Г.П. Королевой и Е.Г. Калачевой за практическую помощь в редактировании статьи; и всем коллегам, сделавшим ценные замечания при подготовке рукописи к печати. Особую благодарность авторы высказывают администрации Северо-Курильского района за внимание к исследованиям и помощь в проведении экспедиционных работ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследова-

ний (проекты 03-05-64044 а, 03-05-79032 к, 03-05-06331 мас).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Апрелков С.Е.* Тектоника и история вулканизма Южной Камчатки // *Тектоника*. 1971. № 2. С. 105-111.
2. *Белоусов В.И., Рычагов С.Н., Сугробов В.М.* Северо-Парамуширская гидротермально-магматическая конвективная система: геологическое строение, концептуальная модель, геотермальные ресурсы // *Вулканология и сейсмология*. 2002. № 1. С. 34-50.
3. *Бернштейн В.А., Сивожазев С.С., Федорченко В.И., Шилов В.Н.* Геофизические наблюдения на некоторых вулканах хребта Вернадского // *Тр. СахКНИИ*. 1966. Вып. 16. С. 44-65.
4. *Гаврилов В.К., Соловьева И.А.* Вулканогенно-осадочные формации геосинклинальных поднятий Малых и Больших Курил. Новосибирск: Наука, 1973. 152 с.
5. Геолого-геофизический атлас Курило-Камчатской островной системы. Ленинград: ВСЕГЕИ, 1987. 36 с.
6. *Горшков Г.С.* Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 288 с.
7. *Зеленое К.К.* Вулканы как источники рудообразующих компонентов осадочных толщ. М.: Наука, 1972. 215 с.
8. *Зубаков В.А.* Глобальные климатические события плейстоцена. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 288 с.
9. *Леонова Л. Л.* Геохимия четвертичных и современных вулканических пород Курильских островов и Камчатки // *Геохимия*. 1979. № 2. С. 179-197.
10. *Кузьмин Д.Ю., Пушкарев В.Г.* Изучение температурного поля и содержания радона в почвенно-пирокластическом чехле с целью картирования проливаемых зон кратерной части вулкана Эбеко // *Современный вулканизм: прогноз, динамика и связанные с ним процессы в недрах Земли и окружающей среде*. Петропавловск-Камчатский, 2001. С. 50-57.
11. *Курякова Г.А., Флоринский И.В.* Анализ пространственных отношений структур центрального типа, топографии и педогеологии. Пушкино: Ин-т почвоведения и фотосинтеза, 1991. 14 с.
12. *Мархинин Е.К., Стратула Д.С.* Гидротермы Курильских островов. М.: Наука, 1977. 212 с.
13. *Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Кирьянов В.Ю. и др.* Вулкан Эбеко (Курильские острова): история эруптивной активности и будущая вулканическая опасность. Ч. I // *Вулканология и сейсмология*. 1993. №3. С. 69-81.
14. *Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Будников В.А.* Активность вулкана Эбеко в 1987-1991 годах. Характер извержений, особенности их продуктов, опасность для г. Северо-Курильска // *Вулканология и сейсмология*. № 6. 1992. С. 21-33.
15. *Нехорошев А.С.* Геотермические условия и тепловой поток вулкана Эбеко // *Бюлл. вулк. станций*. 1960. № 29. С. 38-46.
16. *Никитина Л.П.* Миграция металлов с активных вулканов в бассейн седиментации. М.: Наука, 1978. 80 с.
17. Опыт комплексного исследования района современного и новейшего вулканизма (на примере хр. Вернадского, о. Парамушир) // *Тр. СахКНИИ*. Вып. 16. Ю.-Сахалинск. 1966. 208 с.
18. *Резников А.А., Муликовская Е.П., Соколов И.Ю.* Методы анализа природных вод. М.: Недра, 1970. 488 с.
19. *Рычагов С.Н.* Гидротермальная система вулкана Баранского, о-в Итуруп: модель геологической структуры // *Вулканология и сейсмология*. 1993. №2. С. 59-74.
20. *Рычагов С.Н.* Эволюция гидротермально-магматических систем островных дуг: автореф. дис... докт. геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ РАН, 2003. 50 с.
21. *Рычагов С.Н., Белоусов В.И., Главатских С.Ф. и др.* Северо-Парамуширская гидротермально-магматическая система: характеристика глубокого геологического разреза и модель современного минерало-рудообразования в ее недрах // *Вулканология и сейсмология*. 2002. № 4. С. 1-19.
22. *Рычагов С.Н., Главатских С.Ф., Гончаренко О.П. и др.* Температурная и минералого-геохимическая характеристика геотермального месторождения Океанское (о-в Итуруп) // *Геология рудных месторождений*. 1993. Т. 35. № 5. С. 405-418.
23. *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.
24. *Сергеев К.Ф.* Тектоника Курильской островной системы. М.: Наука, 1976. 240 с.
25. *Сидоров С.С.* Активизация вулкана Эбеко и эволюция его гидротермальной деятельности в предшествующий период // *Бюл. вулканол. станций*. 1966. №40. С. 61-69.
26. Стратегия развития топливно-энергетического потенциала Дальневосточного экономического района до 2020 г. Владивосток: Дальнаука, 2001. 112 с.
27. *Трухин Ю.П., Степанов И.И., Шувалов Р.А.* Ртуть в современном гидротермальном процессе. М.: Наука, 1986. 199 с.
28. *Фазлуллин С.М.* Геохимическая система реки Юрьева (Курильские острова), Ч. I: условия поступления и выноса химических элементов в бассейн реки // *Вулканология и сейсмология*. 1999. № 1. С. 54-67.
29. *Федорченко В.И., Абдурахманов А.И., Родионова Р.И.* Вулканизм Курильской островной дуги: геология и петрогенезис. М.: Наука, 1989. 238 с.
30. *Henley R.W., Ellis A.J.* Geothermal systems, ancient and modern // *Earth Science Reviews*. 1983. № 19. P. 1-50.
31. *Hochstein M.P.* Crustal heat transfer in the Taupo Volcanic Zone (New Zealand): comparison with other volcanic arcs and explanatory heat source models // *J. Vol. Geoth. Res*. 1995. V. 68. Issue 1-3. P. 117-151.
32. *Koike K., Kawaba K., Yoshinaga T., Ohmi M.* Characterization of latent fault based on soil radon concentration, Japan // *J. Geoph. Exploration*. 1996. V. 49. P. 347-359.

33. *Koike K, Tomita S., Yoshinaga T., Ohmi M.* Fracture zone characterization in geothermal field using satellite image, fluid flow analysis, and radon prospecting: a case study of the ASO caldera, southwest Japan // *Proceedings 25 workshop Stanford Un-ty, 2000.* P. 275-282.
34. *Phelps D., Buseck P.R.* Distribution of Soil Mercury and the Development of Soil Mercury Anomalies in the Yellowstone Geothermal Area, Wyoming // *Economic Geology.* 1980. V. 75. P. 730-741.
35. *Semprini L., Kruger P.* Relationship of radon concentration to Spatial and Temporal variations of reservoir thermodynamic conditions in the Cerro Prieto geothermal field // *Geothermics.* 1984. V. 13. P. 103-115.

North Kuril Geothermal Field: Geologic Structure and Development Potential

S. N. Rychagov, V. G. Pushkarev, V. I. Belousov, D. Yu. Kuzmin, A. V. Mushinskii, E. I. Sandimirova, I. A. Boikova, O. V. Shulga, A. G. Nikolaeva, N. P. Egorova

Institute of Volcanology, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia

Studies in morphostructure, geology, geophysics and geochemical gases have been made on the eastern slope of the Vernadsky Range adjacent to the town of Severo-Kurilsk, Paramushir I. We show the structure of locations where near-surface and deep-seated thermal water is found. These data are of key significance for developing a conceptual and an exploration model for the Severo-Kurilsk geothermal field and for understanding the mechanisms that have operated to produce the present-day metal mineralization in the interior of this hydro-thermal-magmatic convective system.