ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК, 2018, том 482, № 2, с. 183–187

ГЕОЛОГИЯ

УДК 553.078.2

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КРУПНЕЙШЕГО НА КАМЧАТКЕ НИЖНЕ-КОШЕЛЕВСКОГО ПАРОДОМИНИРУЮЩЕГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

© 2018 г. С. Н. Рычагов*, И. Ф. Абкадыров, Ю. Ю. Букатов, И. А. Нуждаев, С. О. Феофилактов

Представлено академиком РАН Е.И. Гордеевым 07.12.2015 г.

Поступило 29.05.2018 г.

Получены принципиально новые данные о строении Нижне-Кошелевского пародоминирующего геотермального месторождения (Южная Камчатка). В центральной части месторождения под основной зоной разгрузки гидротерм выделена изометрическая в плане и распространяющаяся на глубину 250–300 м в форме неправильной чаши область интенсивно аргиллизированных пород, насыщенных паро-газовой смесью. Эта область связана с источником тепла субвертикальным каналом повышенной трещинно-поровой проницаемости, погружающимся на глубину >5 км. В недрах месторождения выделены элементы палеогидротермальной системы: блоки пород, сложенные пропилитами и вторичными кварцитами с эпитермальной рудной минерализацией. Перенос тепла осуществляется сквозькоровым потоком восстановленного углеводородного флюида.

DOI:

В 1970-е годы проведена оценка ресурсов тепла Кошелевского вулканического массива (Южная Камчатка) в связи с развитием геотермальной энергетики в регионе. На основании гидрогеотермических исследований выделены две крупные термоаномалии (т/а): Верхне- и Нижне-Кошелевская [1]. Бурением скважин в районе Нижне-Кошелевской т/а оконтурена зона перегретого пара, распространяющаяся на глубину >1,5 км. Установлено пародоминирующее геотермальное месторождение электрической мощностью 94 МВт [6]. Прогнозные геотермальные ресурсы всего Кошелевского вулканического массива составляют ≥300 МВт$_э$. Научный интерес к этому объекту связан с особым геодинамическим положением массива и сквозькоровым характером газо-гидротермальной (флюидной) системы [8]. Наши исследования направлены на получение новых данных о строении Нижне-Кошелевского геотермального месторождения и физической природе геологических структур, контролирующих потоки восходящих флюидов и участки разгрузки металлоносных растворов.

Кошелевский вулканический массив включает 5 стратовулканов нижнечетвертичного—голоценового возраста: Древний, Западный, Валентин, Центральный, Восточный. Массив расположен на сочленении камчатского и курильского сегментов островной дуги [3]. Магнитотеллурическим зондированием, региональными гравиметрическими и изотопно-геохимическими исследованиями подтверждено глубинное заложение вулкано-тектонических структур этого участка земной коры и отмечено влияние мантийного источника на состав восходящего углеводородного флюида [7]. Верхне-Кошелевская т/а локализована в центральной части массива в эрозионном кратере влк. Валентин, по-видимому, в области влияния остывающего субинтрузивного тела диоритов — габбродиоритов [1, 8]. Нижне-Кошелевская т/а расположена на западном склоне массива в глубоковрезанной долине руч. Гремучий, трассирующей региональное тектоническое нарушение [7]. В нижней части геологического разреза вскрыта многофазная субвулканическая интрузия диоритов. Зона сухого пара, выделяемая на основании гидродинамических испытаний скважин [6], приурочена к апикальным частям интрузии и, вероятно, имеет с ней парагенетическую связь: интрузивные породы образованы в нижне-среднечетвертичный период, в настоящее время “холодные” и не служат источником тепла. Предполагают, что тепло переносится углеводородным флюидом из глубоких горизонтов земной коры. Приповерхностный лаво-экструзивный комплекс андезидацитов является верхним водоупором в современной

Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Петропавловск-Камчатский

**E-mail: rychsn@kscnet.ru*

гидротермальной системе [5, 6]. Подъем глубинных хлоридно-натриевых аммониевых гидротерм и циркуляция сульфатных вод сложного катионного состава происходит по вертикальным зонам разуплотнения пород, что не исключает наличие субгоризонтальных зон повышенной трещинно-поровой проницаемости.

Низкочастотное микросейсмическое зондирование (НМЗ) выполняли по профилю С–Ю длиной 4 км, пересекающему выделенные ранее основные геологические структуры месторождения. Использовали 5 портативных цифровых широкополосных сейсмометров Guralp CMG-6TD (f = 0,033–50 Гц), два из которых были опорными для устранения эффекта нестационарности микросейсмического сигнала [2]. Полученный разрез отражает распределение зон пород, характеризующихся контрастными скоростями поперечных сейсмических волн в земной коре до глубины 5 км (рис. 1). Разрез делится на две части, отличающиеся по физическим параметрам среды. Северная часть профиля пересекает эрозионный цирк: аномалии распространяются на глубину до 700–800 м и характеризуются низкоамплитудными значениями интенсивности сейсмического сигнала, что указывает на высокие скорости прохождения сейсмических волн в породах. Этот участок представлен лаво-экструзивным комплексом андезидацитов влк. Западный, объемная плотность пород 2,5–2,7 г/см^3. Субвертикальная низкоскоростная аномалия поперечным сечением до 100 м, секущая эту область, пространственно совпадает с долиной руч. Аргиллизитовый, который трассирует установленный ранее разлом. Низкоскоростная субвертикальная аномалия в центральной части разреза распространяется на глубину >1 км и также соответствует разрывному тектоническому нарушению. В южной части разреза преобладают высокоамплитудные аномалии, характеризующиеся низкими скоростями прохождения сейсмических волн. Природа таких аномалий в пределах высокотемпературных геотермальных систем связана с насыщением пор и трещин паро-газовой смесью. Это приводит к возрастанию внутрипорового давления и, как следствие, уменьшению эффективного напряжения и снижению скоростей упругих волн [4]. Непосредственно под т/а выделяются две низкоскоростные аномалии. Одна имеет форму чаши, распространяется до глубины 250–300 м и соответствует области насыщенных паро-газовой смесью аргиллизированных пород (зоне гипергенеза современной гидротермальной системы). Эта аномалия на глубине >300 м переходит в неоднородную субвертикальную зону, мощность которой увеличивается с глубиной. Вероятнее всего, зона — трещинно-брекчиевая структура в виде субвертикального канала, по которому происходит подъём паро-газового теплоносителя к дневной поверхности. Данная аномалия приурочена к выделенному ранее глубинному разлому, трассирующему руч. Гремучий, и погружается в недра субинтрузивного тела. Южнее Нижне-Кошелевской т/а выделяется ещё одна низкоскоростная субвертикальная аномалия, распространяющаяся на глубину >3 км. Она приурочена к Нижне-Кошелевскому Новому термальному полю (т/п) и представляет большой интерес: структурное положение, выдержанность на глубину и образование линзообразных участков, объединяющих ее с аномалией руч. Гремучий на глубине >1,5–2,0 км — всё это позволяет утверждать, что она соответствует субвертикальной зоне восходящего паро-газового потока.

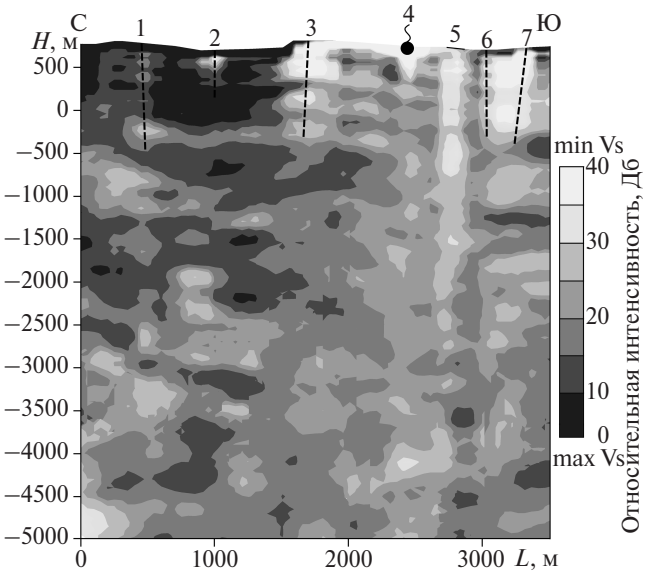

Рис. 1. Разрез, отражающий глубинное распределение относительных скоростей сейсмических волн в районе Нижне-Кошелевского пародоминирующего геотермального месторождения. 1–7 — основные тектонические и гидрогеологические структуры по данным интерпретации НМЗ и в сопоставлении с материалами поисково-разведочных работ. 1 — разлом руч. Аргиллизитовый, 2 — скрытое малоглубинное тектоническое нарушение, 3 — разлом Верхний Сдвинутый, 4 — Нижне-Кошелевская т/а и Нижне-Кошелевское Новое т/п, 5 — древняя и современная зона тектонических нарушений по руч. Прямой, 6, 7 — тектоническая зона, трассируемая руч. Цирк [5].

Гравиметрические наблюдения выполнены в центральной части Нижне-Кошелевского месторождения. Мы использовали гравиметр Scintrex CG-5 Autograv (диапазон измерений >7000 мГал, разрешающая способность до 0,001 мГал). Необхо-

димую точность определения высот в пунктах наблюдения достигали с помощью GPS-станций Trimble (базовой) и Topcon (переносной). Выделена система сопряженных гравитационных аномалий, свидетельствующих о наличии плотностных неоднородностей в верхней части разреза. Двумерная плотностная модель представлена 7 блоками, плотность пород в пределах которых 1,9–2,3 г/см^3. Ошибка моделирования 0,065. В районе Нижне-Кошелевской т/а выделяется 3 блока пород с плотностью 2,0; 2,1 и 2,2 г/см^3 и мощностью 200–400 м. В центральной части разреза выделен блок пород с плотностью 1,9 г/см^3, расположенный под Нижне-Кошелевским Новым т/п. Эти данные подтверждают наличие субвертикальной зоны повышенной трещиноватости (пористости) пород, которая могла послужить каналом для внедрения паро-газового флюида, спровоцировавшего образование термального поля [5].

Магнитометрические исследования проводили с помощью двух протонных магнитометров ММП-203 (точность измерений ±1 нТл, среднеквадратичная ошибка ≤ ±10 нТл) на площади 2 км^2, перекрывающей гравиметрические наблюдения. Площадь исследований расширена до 11 км^2 за счет съемки в зимний период с помощью снегоходов и использования магнитометров GSM-19W v7,0. Выделены три отрицательные аномалии ΔT_a: северная, центральная и южная (рис. 2). Образование южной связано с субширотной тектонической зоной, которая трассируется долиной руч. Прямой [5]. Сопряжённая с этой зоной отрицательная магнитная аномалия объясняется выщелачиванием из пород ферромагнитных минералов в процессе палеогидротермальной деятельности: здесь по данным бурения установлены пропилиты и вторичные кварциты [7]. Центральная аномалия распространяется в области разгрузки современных парогидротерм, где происходит аргиллизация пород и окисление магнитных фракций. Размеры аномалии превышают площадь температурного поля, ограниченного изотермой 20 °С, что свидетельствует в пользу широкого распространения аргиллизированных пород за пределами видимых границ Нижне-Кошелевской т/а. Северная область отрицательных значений ΔT_a тяготеет к зоне разрывного тектонического нарушения Верхний Сдвинутый и, возможно, связана с геотермальной структурой на глубине [5]. Эта область может быть перспективной для поиска сухого пара или перегретых гидротерм.

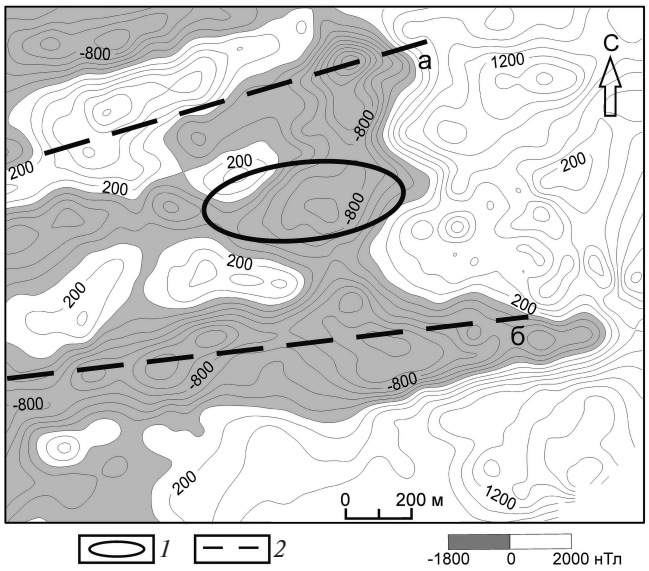

Рис. 2. Карта аномалий магнитного поля ΔT_a в районе Нижне-Кошелевского пародоминирующего геотермального месторождения. *1* — Нижне-Кошелевская т/а, *2* — разломы: *а* — Верхний Сдвинутый, *б* — Прямой.

Электроразведочные работы проводили методом ВЭЗ с симметричной четырехэлектродной расстановкой AMNB, использовали аппаратуру: измеритель МЭРИ-24, генератор ВП-1000. Средняя относительная погрешность измерений 2,4%. Профиль длиной 1,2 км пересекает основную и новообразованную геотермальные аномалии. На геоэлектрическом разрезе выделены четыре горизонта пород. Первый характеризуется значениями ≥2000 Ом·м и изменением мощности от 40 м за пределами Нижне-Кошелевской т/а до 0 м в зоне разгрузки парогидротерм. Второй (500–600 Ом·м) выделяется за пределами т/а, имеет устойчивое распространение и мощность 16–31 м. Третий характеризуется величиной кажущегося удельного сопротивления пород 120–170 Ом·м, его мощность от 3 вблизи т/а до ≥155 м на удалении от неё. По-видимому, эти горизонты пород обладают свойствами верхнего водоупора для современной гидротермальной системы. Нижняя часть разреза представлена толщей пород, обладающих сопротивлениями 3–30 Ом·м (четвёртый горизонт). Верхняя кромка этого горизонта приближается к дневной поверхности в районе Нижне-Кошелевской т/а. Минимальные значения кажущегося сопротивления (<5 Ом·м) наблюдаются в районе Нижне-Кошелевского Нового т/п, что свидетельствует в пользу его образования за счёт поступления геотермального теплоносителя. Таким образом, четвёртый горизонт — приповерхностный геотермальный резервуар — область аргиллизированных пород, насыщенных паро-газовой смесью.

Получены принципиально новые данные о строении крупнейшего на Дальнем Востоке России Нижне-Кошелевского пародоминирующего геотермального месторождения (рис. 3). Непосредственно под Нижне-Кошелевской т/а выделена зона гипергенеза гидротермальной системы: изометричная в плане и распространяющаяся на глубину 250–300 м в форме неправильной чаши область разуплотнённых интенсивно аргиллизированных пород, насыщенных паро-газовой смесью. Установлено, что зона гипергенеза значительно шире, чем размеры Нижне-Кошелевской т/а на дневной поверхности: выходит за пределы геоморфологических границ т/а и оконтуривающей её изотермы 20 °С. Зона связана с источником тепла субвертикальным каналом, объединяющимся с ещё более ярко выраженной зоной повышенной проницаемости для паро-газового флюида мощностью до 300–350 м. Последняя погружается на глубину >5 км. Вероятно, именно эта зона “ответственна” за образование в 2008–2009 гг. новой термоаномалии на западном склоне Кошелевского вулканического массива: Нижне-Кошелевского Нового т/п. В приповерхностных горизонтах гидротермальной системы выделяются отдельные субвертикальные каналы повышенной проницаемости пород, по которым паро-газовая смесь и гидротермальные растворы разгружаются в районе Нижне-Кошелевской т/а. На примере Нижне-Кошелевского Нового т/п показано, что в зоне гипергенеза геотермального месторождения существуют скрытые разгрузки теплоносителя. В недрах месторождения выделены также элементы палеогидротермальной системы: относительно холодные блоки пород, сложенные пропилитами и вторичными кварцитами с эпитермальной рудной минерализацией. Блоки пород, принадлежащие современной и палеогидротермальной системам, разделены крутопадающими разрывными тектоническими нарушениями. Многофазная субвулканическая интрузия — крупная физическая неоднородность и источник тектонических деформаций в структуре гидротермальных систем. Брекчиевая мантия субинтрузии может служить зоной перетока высокотемпературных (перегретых) гидротерм хлоридно-натриевого состава. Источник тепла, вероятно, имеет магматическую природу и расположен в нижних горизонтах земной коры, что подтверждают региональные геофизические данные и материалы изотопно-геохимических исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16–05–00007).

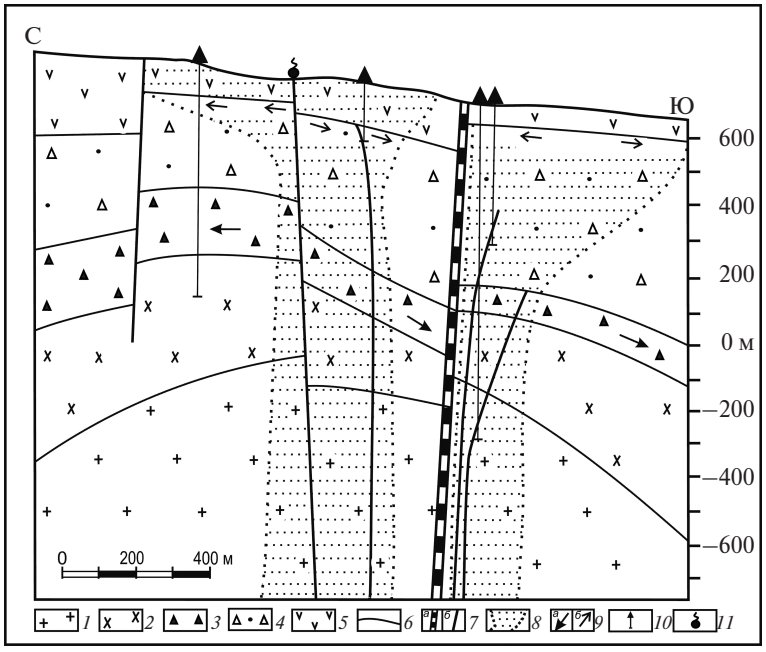

Рис. 3. Концептуальная геолого-геофизическая модель Нижне-Кошелевского пародоминирующего геотермального месторождения. Использованы материалы поисково-разведочных работ [6]. *1* — диориты; *2* — диоритовые порфириты; *3* — брекчиевая мантия субвулканической интрузии (в обломочной массе — вмещающие вулканогенно-осадочные породы и диоритовые порфириты, цемент интрузивный); *4* — вулканогенно-осадочные породы; *5* — андезидациты лаво-экструзивного комплекса; *6* — литологические и интрузивные границы; *7* — тектонические разрывные нарушения: *а* — древние залеченные вторичными минералами, *б* — современные; *8* — зоны повышенной трещинно-поровой проницаемости для паро-газового флюида; *9* — водные потоки: *а* — перегретые гидротермы, *б* — конденсатные и смешанные воды; *10* — скважины; *11* — центральная часть Нижне-Кошелевской т/а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вакин Е.А.*, *Декусар З.Б.*, *Сережников А.И.*, *Спиченкова М.В.* Гидротермы Кошелевского вулканического массива. В сб.: Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 58–84.
2. *Горбатиков А.В.*, *Степанова М.Ю.*, *Кораблев Г.Е.* Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм // Физика Земли. 2008. № 7. С. 66–84.
3. Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки. М.: Наука, 1980. 172 с.
4. *Киссин И.Г.* Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука, 2009. 328 с.
5. *Нуждаев И.А.*, *Феофилактов С.О.* Современное состояние изученности строения центральной части Нижне-Кошелевского геотермального месторождения (Южная Камчатка) и результаты магнитной съемки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 2. В. 22. С. 231–241.
6. *Писарева М.В.* Зона природного пара Нижнекошелевского геотермального месторождения // Вулканология и сейсмология. 1987. № 2. С. 52–63.
7. *Поздеев А.И.*, *Нажалова И.Н.* Геология, гидродинамика и нефтегазоносность Кошелевского месторождения парогидротерм // Вулканология и сейсмология. 2008. № 3. С. 32–45.
8. *Рычагов С.Н.* Гигантские газо-гидротермальные системы и их роль в формировании пародоминирующих геотермальных месторождений и рудной минерализации // Вулканология и сейсмология. 2014. № 2. С. 3–28.