



УДК 553.078.2

И. А. Нуждаев, С. О. Феофилактов

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
г. Петропавловск-Камчатский  
e-mail: ivandf@kscnet.ru, serg415@kscnet.ru*

## **Геолого-геофизическая модель центральной части Нижне-Кошелёвского геотермального месторождения на основании магнитометрических исследований**

В районе Нижне-Кошелёвской термоаномалии в период с 2010 по 2011 гг. выполнена пешеходная магнитная съёмка с целью изучения структуры одноимённого пародоминирующего геотермального месторождения, расположенного на юго-западном склоне Кошелёвского вулканического массива (Южная Камчатка). Измерения модуля магнитной индукции ( $T$ ) производились протонными магнитометрами ММП-203 (расхождения показаний приборов  $\pm 1$  нТл, что соответствует точности прибора). Для исследуемого участка площадью  $1,5 \text{ км}^2$  составлена детальная карта магнитных аномалий  $\Delta T$  со среднеквадратичной ошибкой измерений 20 нТл. На основании полученных значений  $\Delta T$ , в программе ZondMAG2D построена двумерная модель распределения магнитной восприимчивости на глубину. Уточнены границы современной геотермальной аномалии, выделена зона пониженных значений магнитного поля, интерпретируемая как палеогидротермальная структура, и область отрицательных значений  $\Delta T$  на севере территории.

### **Введение**

Паужетско-Камбально-Кошелёвский геотермальный (рудный) район расположен на южной оконечности Камчатского полуострова. В районе находится известное эксплуатируемое вододоминирующее геотермальное месторождение — Паужетское. Южнее располагается Кошелёвский вулкан, в центральной части которого расположено Верхне-Кошелёвское термальное поле, а на западном склоне — Нижне-Кошелёвская термоаномалия. Проведение научно-исследовательских и поисково-разведочных работ позволило выявить в районе термоаномалии пародоминирующее геотермальное месторождение, глубинное строение которого слабо изучено [3, 6].

Цель настоящей работы — изучение структуры Нижне-Кошелёвского пародоминирующего геотермального месторождения с помощью магнитометрических исследований.

Задачи: 1) проведение детальной пешеходной магнитной съёмки; 2) уточнение границ современной геотермальной аномалии; 3) построение геолого-геофизической модели центральной части Нижне-Кошелёвского геотермального месторождения по магнитометрическим данным в комплексе с имеющимися данными.

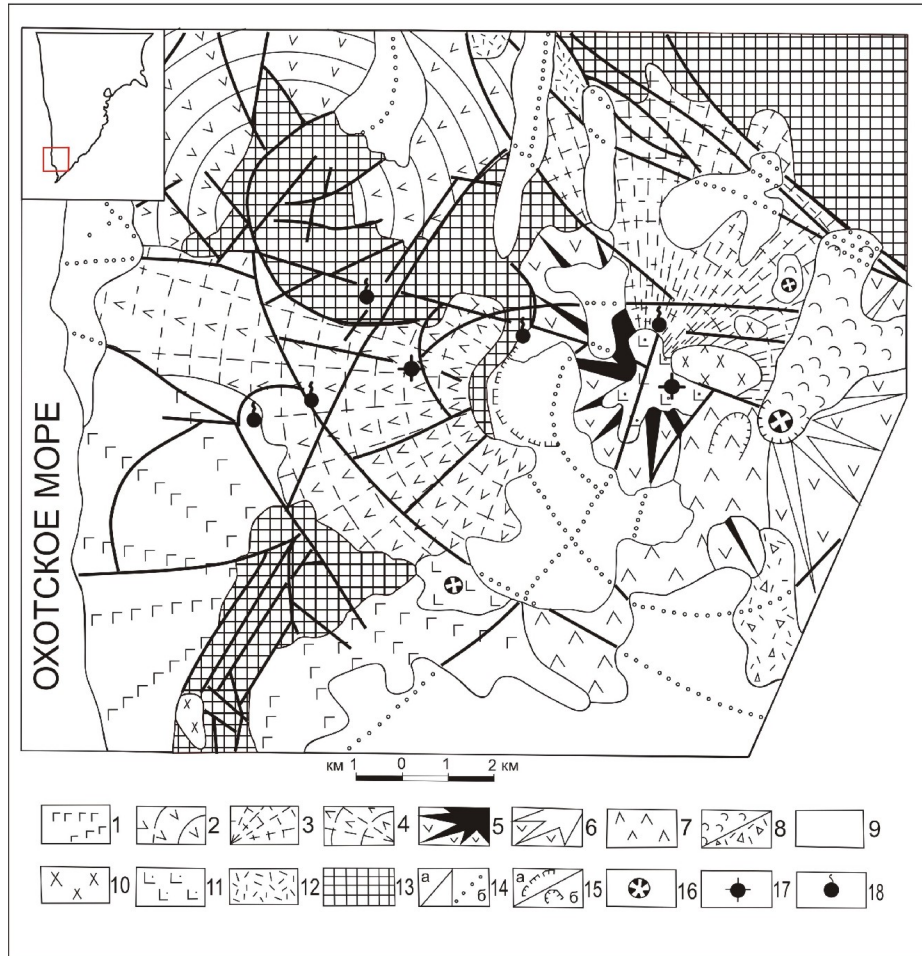
### **Краткая геологическая характеристика района работ**

Вулкан Кошелёвский представляет значительный интерес для геолого-геофизических исследований, поскольку является длительно развивающейся тектоно-магматической структурой. В этом районе проводили свои исследования Е. А. Вакин,

З. Б. Декусар, С. И. Набоко, Б. И. Пийп, М. В. Писарева, А. И. Сережников, М. В. Спиченкова, др. учёные. Геофизические поисково-разведочные работы выполнялись под руководством В. К. Соловьёва, Ю. Л. Корякина, Я. Б. Шварца. В последние годы на вулкане Кошелёвский и в Паужетско-Камбально-Кошелёвском геотермальном (рудном) районе комплексные исследования проводит Южнокамчатско-Курильская экспедиция ИВиС ДВО РАН [8].

Кошелёвский вулканический массив состоит из нескольких разрушенных в различной степени вулканов, экструзивных куполов и отпрепарированных эрозией субвулканических тел. В его постройке выделяются вулканы: Древний, Западный, Валентин, Центральный, Восточный (рис. 1). В центральной части массива наблюдается дугообразная стенка взрывного происхождения, названная Активным Кратером. Вулканы несимметричны: новые постройки обычно возникали на месте разрушенных частей более древних вулканов с небольшим смещением вулканического центра. Формирование массива началось в среднем плейстоцене, максимальной степени вулканическая активность достигла в верхнем плейстоцене, в голоцене она постепенно затухает (здесь и ниже характеристика строения вулкана дана, в основном, по работе [4]).

Вулкан Древний наиболее разрушен, сохранилась лишь северная часть постройки. Он относится к типичным стратовулканам, в его постройке принимают участие три выдержанные по простиранию группы потоков. Нижняя группа — лавы пироксеновых базальтов, лавы и лавобрекчии плагиобазальтов (мощность 250–300 м), средняя — агглютинаты,



**Рис. 1.** Схематическая карта геологического строения и термопроявлений Кошелевского вулканического массива. Опубликовано в работе [2], составили А. И. Серезников, М.В Спиченков, З. Б. Декусар 1, 2 — эффузивные и пирокластические образования нижнечетвертичных вулканов: 1 — вулкан Дед и Баба ( $\alpha\beta QI$ ); 2 — вулкан Третья Речка ( $\alpha\beta QII$ ); 3–8 — эффузивные и пирокластические образования Кошелевского вулканического массива: 3 — вулкан Древний ( $\alpha QII$ ); 4 — вулкан Западный ( $\alpha Q_1 III$ ); 5 — вулкан 1545 (Валентин) ( $\alpha Q_2 III$ ); 6 — вулкан Восточный ( $\beta Q III - IV$ ); 7 — вулкан Центральный ( $\alpha\beta Q III - IV$ ); 8 — образования Активного кратера: а) лавовые потоки ( $\beta Q IV$ ), б) отложения направленного взрыва ( $Q IV$ ); 9 — рыхлые отложения различного генезиса ( $Q II - Q IV$ ); 10 — экструзии голоценового возраста: а) андези-дацитов и дацитов ( $\alpha\gamma Q IV$ ), б) базальтов ( $\beta Q IV$ ); 12 — субвулканические интрузии долеритов ( $\beta Q III - IV$ ); 13 — дочетвертичные эффузивы ( $\alpha N 1 - N 2$ ); 14 — разрывные нарушения: а) прослеженные и расшифрованные по аэрофотоснимкам, б) под рыхлыми отложениями; 15 — а) кальдеры; б) эродированные кратеры и воронки взрывов; 16 — кратеры эффузивных и шлаковых конусов; 17 — термальные поля (парогидротерм); 18 — термальные источники

туфы и шлаки базальтового состава, лавы, лавобрекчии оливин-пироксеновых базальтов (400 м), верхняя — лавы оливин-пироксеновых базальтов и оливин-пироксеновых андези-базальтов. Возраст вулкана ниже-среднеплейстоценовый.

Вулкан Западный сложен лавовыми потоками однообразных мелкопорфировых двупироксеновых андезитов, андези-дацитов и андези-базальтов. Вершина конуса не сохранилась, на её месте образовалась кальдера. По возрасту вулкан отнесён к среднему плейстоцену.

Вулкан Валентин представляет собой конусовидный горный массив. В результате вулкано-тектонических перестроек и интенсивной эрозии кра-

тера в его центральной части образовалась крупная воронка площадью 2 км<sup>2</sup>, в которой происходит разгрузка Верхне-Кошелевских парогидротерм. Постройка сложена четырьмя группами пород. Первая группа представлена туфобрекчиями и туфо-конгломератами андезитов и андези-базальтов (мощность 100–300 м), вторая — лавами двупироксеновых андезитов, андези-дацитов и оливин-содержащих андези-базальтов (300 м), третья — лавами двупироксеновых андезитов, переходящих в оливин-содержащие андези-базальты (50–350 м). Четвёртая группа потоков объединяет наиболее молодые образования вулкана: лавы пироксеновых андези-базальтов, двупироксеновых андези-базальтов и дву-

пироксеновых андезитов (мощность 300 м). Время формирования вулкана — верхний плейстоцен, он моложе первой фазы оледенения.

Вулкан Центральный образует крупную конусовидную постройку, состоящую преимущественно из потоков лав и лавобрекчий оливин-содержащих андези-базальтов (мощность 350 м). Вулкан не затронут оледенением, время формирования его постройки — конец верхнего плейстоцена — начало голоцена.

Вулкан Восточный образовался и действовал синхронно с вулканом Центральным, но продукты его извержения имеют кислый состав. Активный кратер возник в результате взрыва вблизи вершины Восточного вулкана. В настоящее время сохранилась лишь южная стенка. После взрыва произошло излияние лавового потока, по составу отвечающего оливиновым базальтам.

Вся средняя часть Кошелёвского вулканического массива прорвана экструзиями андези-дацитов и субвулканическими телами долеритов. Возраст этих образований голоценовый. Аналогичные образования слагают центральные части вулканов Валентин, Древний, Центральный.

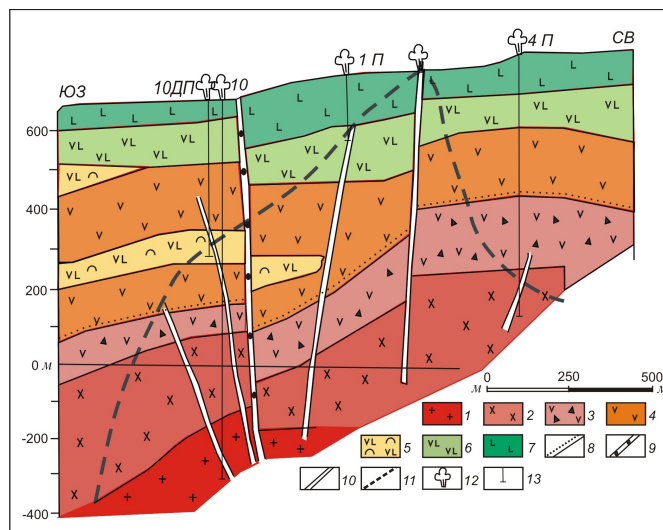
Одной из главных особенностей тектоники участка Кошелёвского вулканического массива является интенсивное дробление на границах крупных вулканических построек. Тектоника в пределах подобных отдельных построек имеет свои черты, обусловленные локальными особенностями вулкана. Как правило, в центральной части вулканов наблюдается более густая сеть трещин, чем на периферии [4].

Наши работы были посвящены, в основном, району Нижне-Кошелёвской термоаномалии и изучению строения одноименного геотермального месторождения. На основании данных поисково-разведочных работ Нижне-Кошелёвское геотермальное пародоминирующее месторождение приурочено к залегающему на глубине многофазному интрузивно-субвулканическому телу (рис. 2)<sup>1</sup>. Оно имеет зональное строение: в основании этого комплекса залегают диориты, они прорываются диоритовыми порфиритами, контактовая зона представлена брекчированными породами интрузивных и вмещающих пород. Над интрузивно-субвулканическим комплексом залегает вулканогенно-осадочная толща, вероятно, неогенового возраста, которая перекрывается лавами и экструзиями четвертичного возраста от среднего до кислого состава [6].

На основании гидродинамических испытаний по скважинам, М. В. Писаревой с коллегами выделена зона пара, выклинивающаяся на дневной поверхности в районе термоаномалии.

По результатам микросейсмических и гравиметрических работ, выполненных И. Ф. Абкадыровым,

<sup>1</sup>М. В. Писарева. Отчёт о поисковых работах, проведённых на Нижне-Кошелёвском месторождении парогидротерм 1975–1984 гг. Камчатский филиал ФГУ «Территориальный фонд геологической информации по Дальневосточному федеральному округу», 1984 г.



**Рис. 2.** Геологический разрез Нижне-Кошелёвского геотермального месторождения. Составлен на основании поисково-разведочных работ и гидродинамических испытаний (1975–84 гг). 1 — диориты; 2 — диоритовые порфириты; 3 — субинтрузивные ксенобрекчии; 4 — андезиты; 5 — туфы андези-базальтов; 6 — лавы андези-базальтов; 7 — лавы андези-дацитов; 8 — граница интрузивно-субвулканического комплекса; 9 — закольматированные более древние разломы; 10 — открытые разломы и трещины; 11 — верхняя граница пара; 12 — проявление пара; 13 — буровая скважина и её номер.

Ю. Ю. Букатовым, Е. С. Рыловым с участием авторов доклада, показано, что зона пара до глубины 150–200 м имеет форму чаши. Это пароводонасыщенная зона распространяется на глубину до 1,5–2 км и расширяется в недрах интрузивного тела [1]. Кроме того, подтверждена выделяемая ранее на основании аэромагнитных, электроразведочных и др. работ зона тектонического нарушения вдоль ручья Прямой (на разрезе крайняя левая разломная зона), возможно являющаяся элементом палеогидротермальной системы. Аналогичная зона палеогидротермальных изменений пород выделена на северо-восточном фланге разреза. В целом, по нашим представлениям район сложен блоками пород с контрастными петрофизическими свойствами: жесткими, плотными (слабопроницаемыми для парогидротерм) и разуплотненными (обладающими повышенной открытой трещинно-поровой проницаемостью).

#### Аппаратура и методика работ

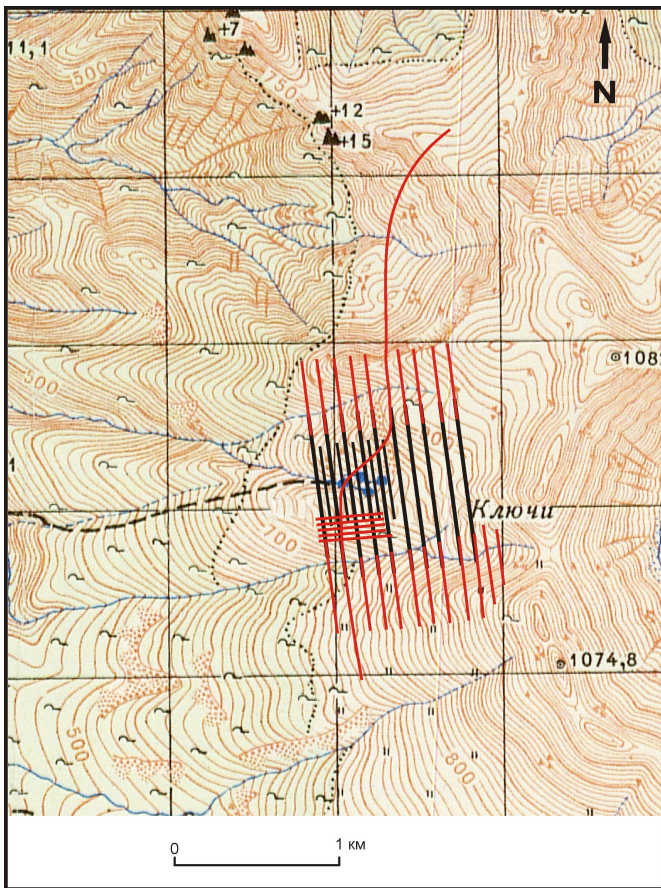
При магнитометрической съёмке использовался пешеходный протонный магнитометр ММП-203, предназначенный для измерений модуля магнитной индукции  $T$ . Магнитометр характеризуется относительно высокой чувствительностью (погрешность составляет  $\pm 1$  нТл), большим диапазоном измерений (20–100 мкТл), относительно высоким быстродействием (продолжительность одного измерения до 3 с), питание от батарей сухих элементов с напряжением  $13 \pm 3$  В; потребляемая мощность около

2 Вт. Прибор может работать при температурах от  $-30$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ . Время установления режима до 60 с. Результат измерений (в нТл) выдается на пятизначный цифровой индикатор.

Съёмка проводилась двумя магнитометрами, один использовался как вариационная станция, другой для рядовых измерений. Расхождения показаний приборов  $\pm 1$  нТл, что соответствует точности аппаратуры.

Магнитометрическая съёмка проводилась в районе Нижне-Кошелевской термоаномалии на протяжении двух полевых сезонов. В 2010 г. была разбита сеть из 15 профилей, 10 из которых протяжённостью 1000 м и 5 по 500 м. Профили ориентировались с севера на юг. Наблюдения производились с шагом 10 м по профилю, в непосредственной близости к термоаномалии и в её пределах шаг составлял 5 м. Расстояние между профилями 100 м в пределах термальной площадки 50 м. Покрытая площадь составила  $1\text{ км}^2$  (рис. 3).

В 2011 г. пройден секущий профиль длиной 3,7 км с шагом 10 м по профилю, в районе термоаномалии и на самой термоаномалии — 5 м. По этому профилю имеются данные микросейсмического зондирования, гравиразведки и магнитометрии. Была расширена основная сеть профилей: добавлено



**Рис. 3.** Схема профилей магнитометрической съёмки. Чёрными линиями показаны профили 2010 г.; красными — профили 2011 г.

9 профилей на севере и 9 профилей на юге длиной 400 м с шагом 10 м по профилю, два профиля на востоке по 400 и 500 м с тем же шагом (рис. 3).

В ходе съёмки в предшествующем году вызвал интерес участок в районе Нижне-Кошелевского Нового термального поля; в 2011 г. на этом участке было пройдено 5 профилей с шагом 5 м с расстоянием 50 м между профилями. Рабочая группа состояла из четырёх человек: оператор вариационной станции, оператор-съёмщик и два помощника. В течение всего рабочего времени на вариационной станции снимались замеры с интервалом 10 минут, что позволило довольно точно проследить изменения магнитного поля на протяжении рабочего времени. Для определения точности съёмки проведены контрольные измерения в размере 20% от всего объёма наблюдаемых значений.

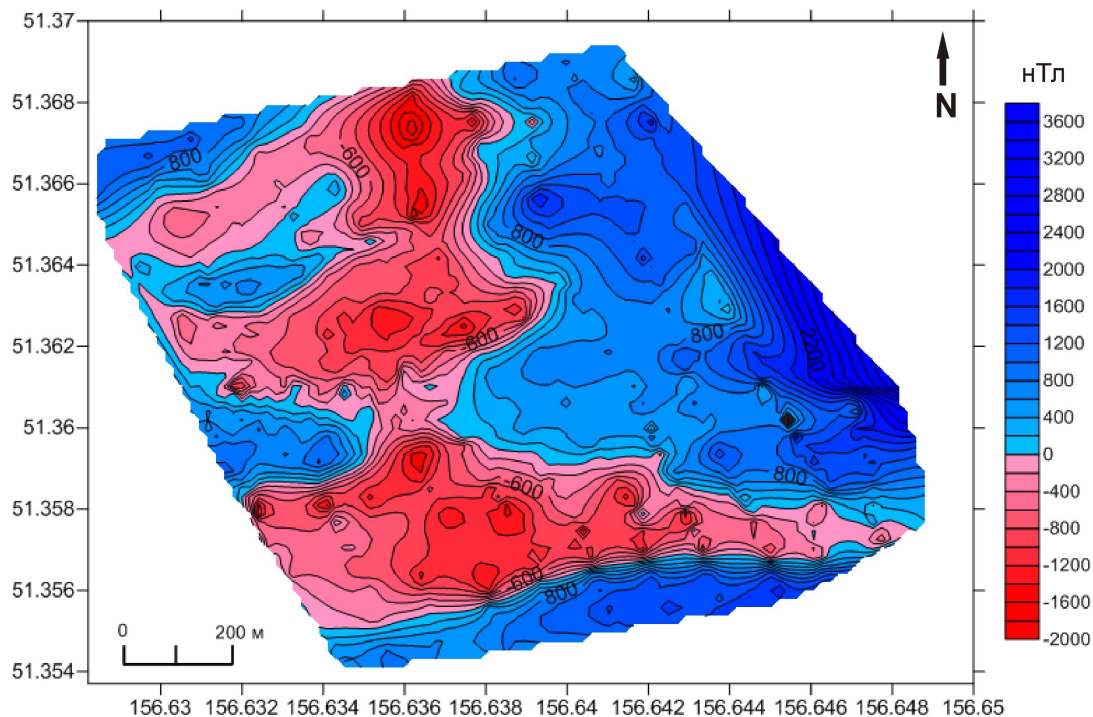
Среднеквадратичная ошибка измерений — 20 нТл.

### Результаты

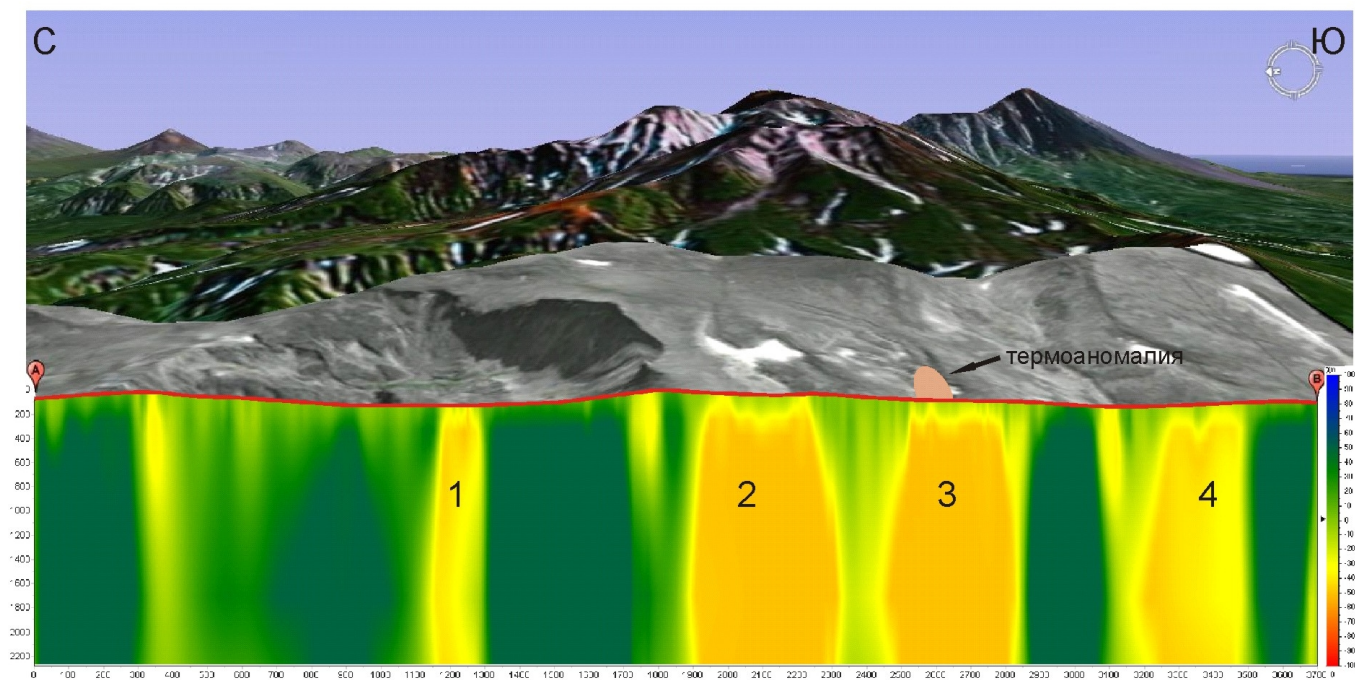
По результатам магнитной съёмки 2010 г. была составлена карта аномалий магнитного поля  $\Delta T$  на район Нижне-Кошелевских парогидротерм, на которой выделились две отрицательные области со значениями до  $-1500$  нТл. Северная приурочена к одноименной термоаномалии, расположенная южнее — к руслу руч. Прямой. По результатам съёмки стало ясно, что карта магнитных аномалий требует дополнений, поскольку получение точных характеристик магнитного поля всегда связано с масштабом съёмки (детальностью работ и, соответственно, размером изучаемой площади). Кроме того, выделена зона сочленения двух аномалий, не известная ранее. Этот вопрос также требовал решения.

По итогам магнитометрических исследований на протяжении двух полевых сезонов составлена карта магнитных аномалий  $\Delta T$ , на которой чётко выделились три отрицательные магнитные аномалии: северная, центральная, южная (рис. 4). Последняя распространяется по зоне разлома, вдоль руч. Прямой. В центральной части было подтверждено наличие перешейка, соединяющего южную аномалию с центральной, приуроченной к термальному полю. Выделена зона пониженных значений  $\Delta T$  на севере территории.

Количественная интерпретация полученного материала направлена на выделение аномалообразующих объектов (определение размеров и местонахождения). Для этого было выполнено двумерное программное моделирование по секущему профилю длиной 3,7 км. Модель распределения магнитной восприимчивости строилась в пробной версии программы ZondMAG2D, разработанной А. Е. Каминским (г. Санкт-Петербург). В программе прописываются значения по профилю:  $\Delta T$ , шаг съёмки, высота датчика магнитометра. Также задаются общие параметры района работ — это модуль вектора нормального магнитного поля, магнитное склонение и магнитное наклонение. Выбираются параметры вертикальной сетки модели: толщина первого слоя,



**Рис. 4.** Карта аномалий магнитного поля  $\Delta T$  в районе Нижне-Кошелевских парогидротерм по данным магнитной съёмки 2010–2011 гг.



**Рис. 5.** Модель распределения магнитной восприимчивости пород по 3,7 км профилю. (1–4 см. в тексте.)

количество слоёв, алгоритм, посредством которого будет решаться обратная задача. В данном случае, это Smoothness constrained — инверсия по методу наименьших квадратов с использованием сглаживающего оператора. В результате применения этого алгоритма, получают гладкое (без резких границ) и устойчивое распределение параметров. Цветовая шкала отвечает за значения магнитной восприимчи-

вости, светлый цвет — низкие значения магнитной восприимчивости, тёмные — высокие. По оси  $X$  — длина профиля в метрах, по оси  $Y$  — глубина в метрах, в данном случае 2,2 км. Нами был построен ряд моделей, исходя из которых, моделирование на глубину 2200 м является более информативным, теоретическая кривая лучше совпадает с графиком значений  $\Delta T$ , также выбранная глубина наиболее

удачна для сопоставления с результатами микросейсмического зондирования.

Построена двумерная модель распределения магнитной восприимчивости пород по секущему профилю (рис. 5). Этот профиль является самым информативным, по нему, как уже говорилось, имеются данные микросейсмического зондирования, гравиметрии и магнитной съёмки. Чётко выделяется зона разлома по Аргиллизитовой структуре (1), центральная область (3), сливающаяся с северной (2), возможно перспективной на глубине, также выделена зона тектонического нарушения — руч. Прямой (4).

#### Выводы:

1. Построена карта аномалий магнитного поля  $\Delta T$  в центральной части Нижне-Кошелевского пародоминирующего геотермального месторождения.

2. Образование южной аномалии связано с субширотной тектонической зоной, в пределах которой низкое содержание магнитных минералов в породах, по-видимому, обусловлено палеогидротермальной деятельностью. Центральная аномалия распространяется в области современной геотермальной термоаномалии, где происходит активное выщелачивание пород (в том числе ферромагнитных минералов). Северная область отрицательных значений  $\Delta T$ , возможно, связана с зоной разрывного тектонического нарушения Верхний Сдвинутый.

3. Магнитометрические исследования в совокупности с микросейсмическими, гравиметрическими и геологическими данными позволяют уточнить строение месторождения на глубину до 2 км: показано распространение и мощность лаво-экструзивного комплекса пород, служащего верхним водоупором для современной гидротермальной системы; уточнены границы геотермальной аномалии; выделены зоны разрывных тектонических нарушений по периферии месторождения.

#### Благодарности

Авторы признательны Ю. Ю. Букатову, Е. С. Рылову, Н. В. Зайцеву, В. Р. Тишкину за непосредственную помощь в проведении магнитометрической съёмки; И. Ф. Абкадырову, А. А. Нуждаеву

и другим своим коллегам за помощь в интерпретации материала

Работы выполнены в рамках исследований Южнокамчатско-Курильской экспедиции ИВиС ДВО РАН при финансовой поддержке Президиума ДВО РАН (проект № 12-III-B-08-172).

Руководитель работ зав. лаб. геотермии, д.г.- м.н. С. Н. Рычагов.

#### Список литературы

1. Абкадыров И. Ф., Горбатиков А. В., Степанова М. Ю., Букатов Ю. Ю. Опыт применения метода микросейсмического зондирования на геотермальных полях на примере Нижне-Кошелевской термоаномалии (Южная камчатка) // Природная среда Камчатки. Материалы IX региональной молодёжной конференции «Природная среда Камчатки». 12–13 апреля 2010 г. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2010. С. 49–60
2. Белоусов В. И. Геология геотермальных полей в современных вулканических областях. М.: Наука, 1978. 178 с.
3. Вакин Е. А., Декусар З. Б., Серезников А. И., Спиченкова М. В. Гидротермы Кошелевского вулканического массива // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 58–84
4. Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки. М.: Наука, 1980. 172 с.
5. Нуждаев И. А., Феофилактов С. О. Магнитометрические исследования в районе Нижне-Кошелевской термоаномалии // Материалы X региональной молодёжной конференции «Природная среда Камчатки». 12–13 апреля 2011 г. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2011. С. 119–129
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, Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2008. № 3. С. 32–45
8. Рычагов С. Н. Исследования Южнокамчатско-Курильской экспедиции ИВиС ДВО РАН в Паужетско-Камбально-Кошелевском геотермальном районе на Камчатке // Вестник Краунц. Науки о Земле. 2008 № 2. Выпуск № 12. С. 203–206