

ОСОБЕННОСТИ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ НИЖНЕ-  
КОШЕЛЕВСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ  
НА ОСНОВЕ СОПОСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ И ГРАВИМЕТРИИ

*Феофилактов С.О., Нуждаев И.А. (5 курс)*

*Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга*

*Научный руководитель: д.г.-м.н. С.Н. Рычагов*

В последние годы в рамках Южнокамчатско-Курильской экспедиции на площади Нижне-Кошелёвского геотермального месторождения проводятся геофизические работы, направленные на изучение глубинного строения геологической структуры, контролирующей поток восходящих высокотемпературных паро-газовых флюидов. Для регистрации микросейсм использовались три сейсмические станции MARS-lite с трехкомпонентными сейсмодатчиками LE-3Dlite фирмы Lennartz. Гравиметрические наблюдения выполнялись высокоточным автоматизированным гравиметром Scintrex CG-5 Autograv (разрешающая способность при снятии показаний достигает 0,001 мГал). В работе представлены результаты гравиметрической съемки двух полевых сезонов и сопоставление их с данными микросейсмического зондирования.

*Ключевые слова: Нижне-Кошелёвская термоаномалия, гравиметрическая съемка, микросейсмическое зондирование, аномалии поля силы тяжести, карта относительной интенсивности, модель.*

## **Введение**

Нижне-Кошелёвские парогидротермы — одни из самых мощных парогидротермальных источников на Камчатке. В рамках Южнокамчатско-Курильской экспедиции Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН в районе Нижне-Кошелёвской термоаномалии проводятся ежегодные геофизические исследования. Цель этих исследований: изучение глубинного строения геологической структуры, контролирующей поток восходящих высокотемпературных паро-газовых флюидов.

В 2008 – 2010 г.г. в районе Нижне – Кошелевской термоаномалии выполнены геофизические исследования методами микросейсмического зондирования и высокоточной гравиметрии [1,2].

В рамках данной работы решаются следующие задачи:

1. Проведение комплексной интерпретации данных гравиметрической съемки и низкочастотного микросейсмического зондирования для уточнения геологического строения Нижне-Кошелевского пародоминирующего геотермального месторождения.
2. Проверка эффективности применения этих методов для изучения геотермальных месторождений.

### **Геологическая характеристика района работ**

Кошелевский вулканический массив расположен на юге Камчатки. Это вытянутый в широтном направлении скалистый хребет, состоящий из пяти сросшихся и сильно разрушенных стратовулканов: Древне-Кошелевский, Западно-Кошелевский, Валентин, Центральнo-Кошелевский, Восточно-Кошелевский (рис. 1). Нижне-Кошелевское пародоминирующее геотермальное месторождение приурочено к вулкану Западно-Кошелевский. Массив сложен преимущественно лавами андезит-базальтового состава.

По выносу тепла, интенсивности и концентрированности гидротермальной деятельности с Кошелевским массивом на Камчатке может сравниться только Долина Гейзеров и такие действующие вулканы, как Мутновский и Шивелуч: вынос тепла на Нижне-Кошелевской термоаномалии Вакин Е.А. с коллегами оценивают в 25 000 ккал/сек, Верхне-Кошелевской – 50 000 ккал/сек.

По геологическим данным Нижне-Кошелевское геотермальное пародоминирующее месторождение приурочено к залегающему на глубине интрузивно-субвулканическому телу (рис. 2) [6].

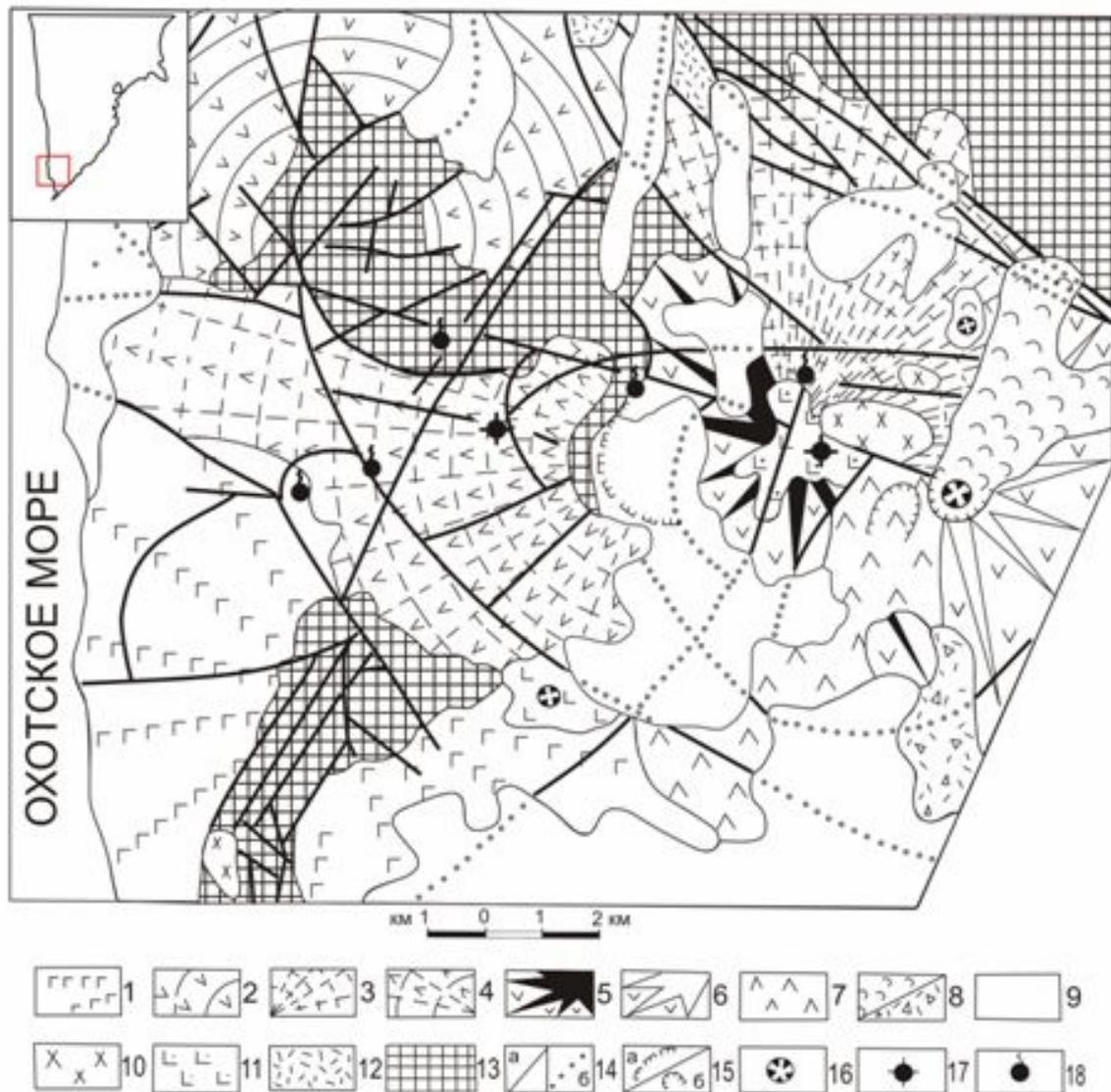


Рис.1. Схематическая карта геологического строения и термопроявлений Кошелёвского вулканического массива [3].

1, 2 – эффузивные и пирокластические образования нижнечетвертичных вулканов: 1 – вулкан Дед и Баба ( $\alpha\beta Q_I$ ); 2 – вулкан Третья Речка ( $\alpha\beta Q_{II}$ ); 3-8 – эффузивные и пирокластические образования Кошелёвского вулканического массива: 3 – вулкан Древний ( $\alpha Q_{II}$ ); 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) андезито-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 (термоаномалии); 18 – термальные источники.

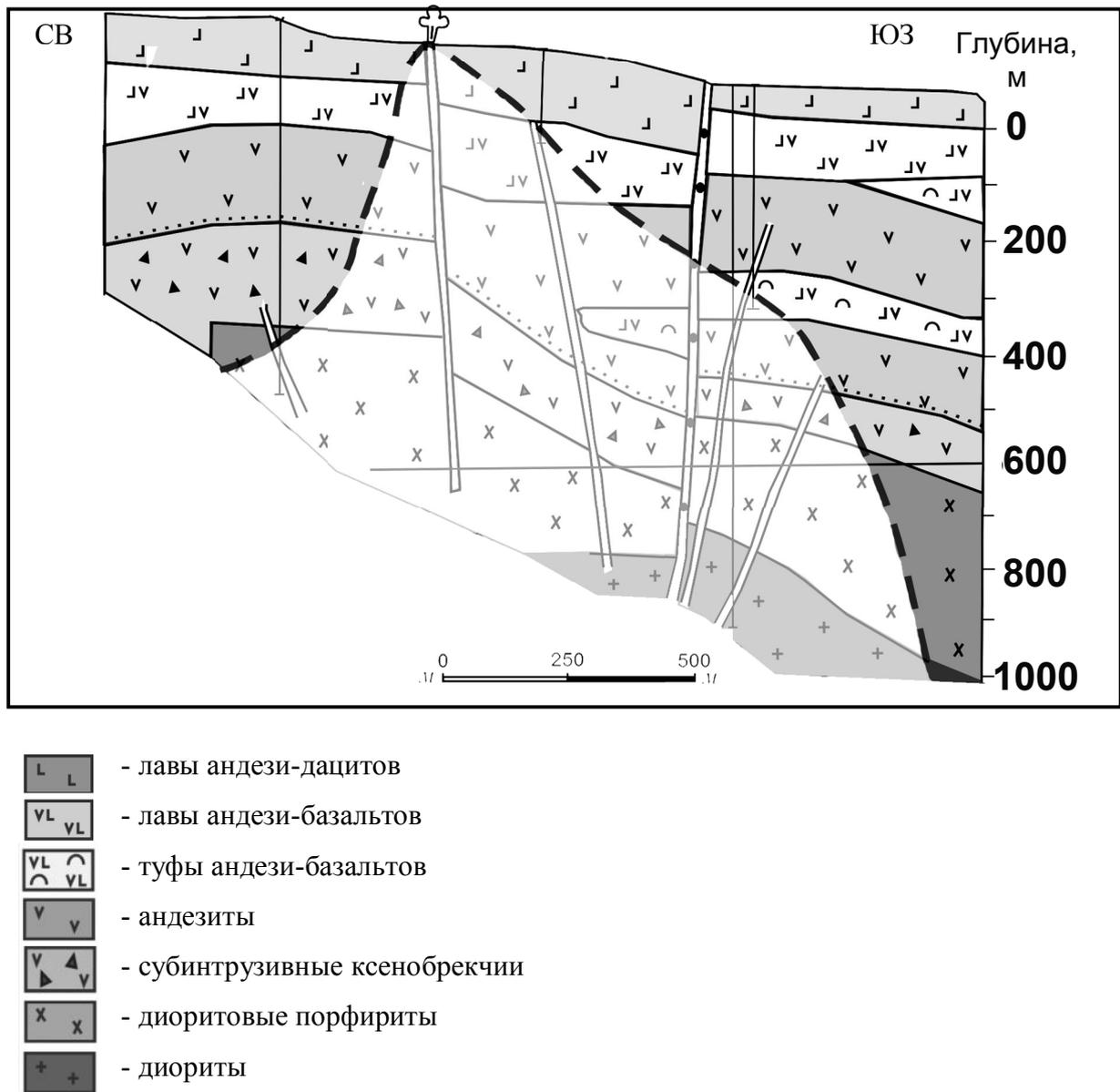


Рис.2. Схема геологического строения Нижне-Кошелевского месторождения [5,6].

Это интрузивно-субвулканическое тело имеет зональное строение: диориты перекрываются диоритовыми порфиритами, контактовая (апикальная) зона представлена брекчированными породами того же состава. К этому многофазному интрузивно-субвулканическому комплексу пространственно приурочена область перегретого пара, верхняя граница которой выклинивается на дневной поверхности и образует термальное поле размером примерно 300 x 500 м. Также на схеме показаны субвертикальные тектонические нарушения, выделенные на основании геолого-геофизических данных и по материалам разведочного бурения.

### Аппаратура и методика проведения работ

Для регистрации микросейсм применялись три сейсмические станции MARS-lite с трехкомпонентными сейсмодатчиками LE-3Dlite немецкой фирмы Lennartz – electronic. Высокоточная гравиметрическая съемка проводилась автоматизированным микропроцессорным гравиметром CG-5 Autograv канадской фирмы Scintrex. Диапазон измерений прибора превышает 7000 мГал, без необходимости переустановки. Разрешающая способность прибора при снятии показаний превышает 0,001 мГал [7]. Привязка пунктов наблюдения осуществлялась с помощью высокоточных геодезических GPS – приемников Trimble и Topcon.

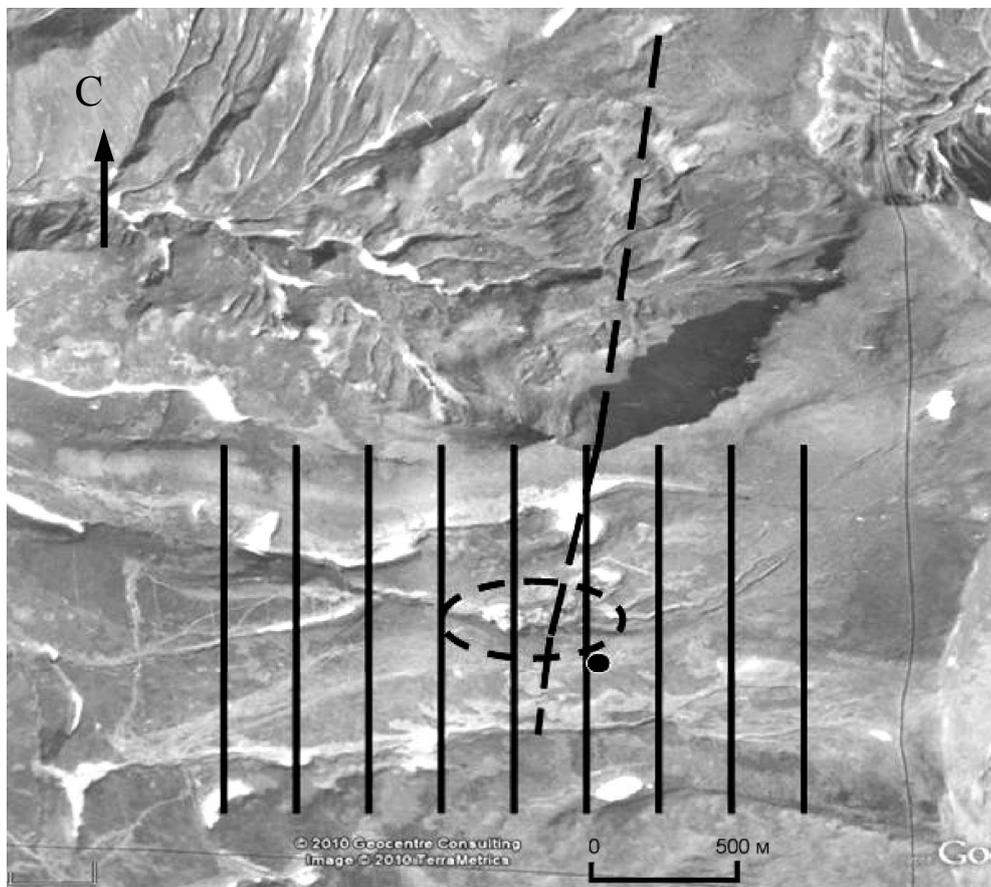


Рис.3. Схема профилей низкочастотного микросейсмического зондирования. (Фотография взята из программы Google).



- профили 2008 г.
- профиль 2009 г.
- контур Нижне-Кошелевской термоаномалии
- стационарная станция микросейсмического зондирования

Низкочастотное микросейсмическое зондирование проводилось в течение двух летних полевых сезонов. В 2008 г. проведена площадная съемка размером 2 x 1,5 км (рис. 3). Была разбита сеть профилей, ориентированных с севера на юг протяженностью 1,5 км каждый и шагом наблюдения по профилю 250 м. Интервал между профилями составил 250 м. В 2009 г. съемка производилась по одному секущему профилю, протяженность которого составила 3 км. Шаг съемки по профилю составил 100 м, в пределах термоаномалии уменьшался до 40 м. Такой масштаб съемки позволил проводить наблюдения для изучения глубинного строения Нижне-Кошелевской термоаномалии [2].

Гравиметрическая съемка в 2009 г. на Нижне-Кошелевской термоаномалии проводилась по сети профилей протяженностью 1 км каждый. Шаг съемки составил 100 – 150 м между профилями и 100 м – по профилю между измерениями. Перпендикулярно рабочим профилям был заложен опорный профиль, на котором измерения производились неоднократно с целью максимально точного определения поправки за смещение нуля-пункта гравиметра [1]. В полевом сезоне 2010 г. была дополнена площадная гравиметрическая съемка. В связи с неблагоприятными погодными условиями было пройдено только четыре профиля, выходящие за пределы изученной площади предыдущего полевого сезона. Шаг съемки остался неизменным. Вкрест всей структуры пройден профиль длиной 3 км с шагом 100 м, в пределах термоаномалии шаг уменьшался до 40 м. Этот профиль проложен строго по профилю микросейсмического зондирования 2009 г., причем измерения двумя методами производились практически по одним и тем же пунктам.

Контроль смещения нуля-пункта прибора определялся также по этому опорному. Для получения гравиметрических данных на каждом пункте выбиралась площадка диаметром около одного метра, на которой устанавливался прибор CG-5. В основе конструкции прибора лежит кварцевая

система, которая в результате колебания выходит из положения равновесия, поэтому после перехода от одной точки к другой необходимо некоторое время, прежде чем проводить измерения [7].

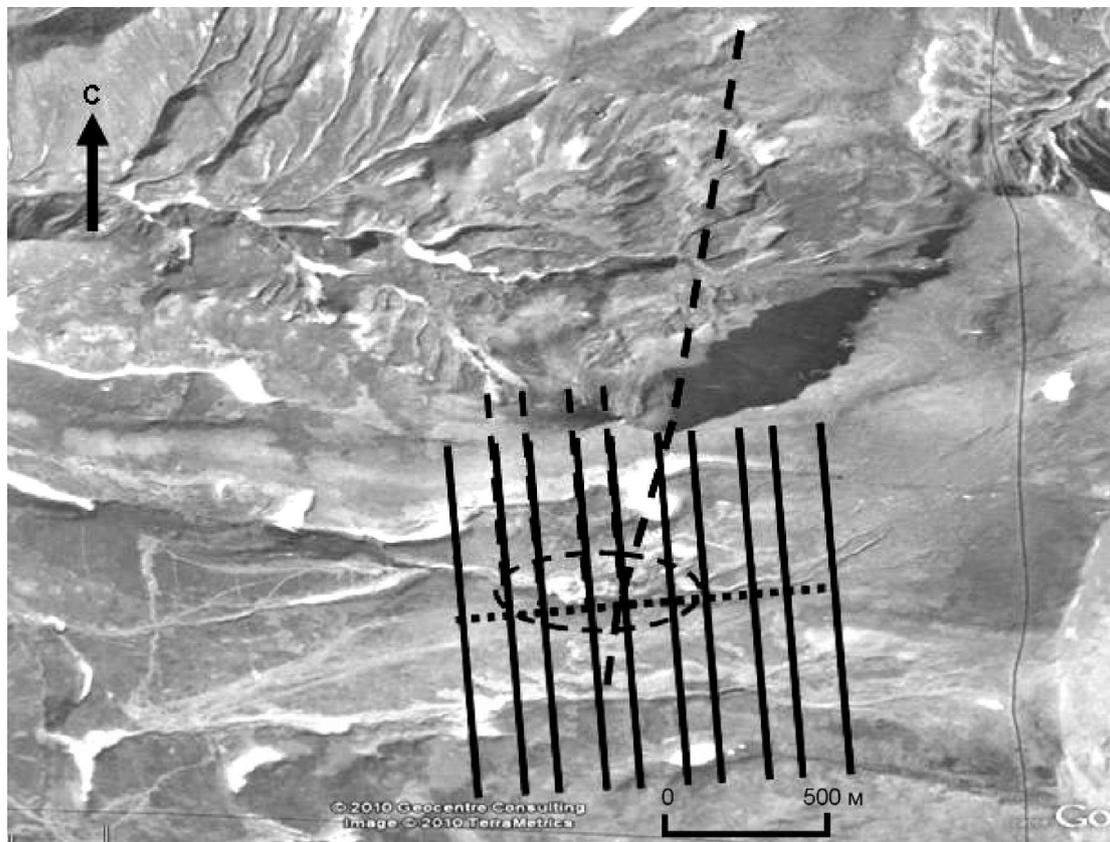
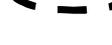


Рис. 4. Схема профилей высокоточной гравиметрической съемки. (Фотография взята из программы Google).

- |   |   |
|---|---|
|  | - профили 2009 г.                         |
|  | - профили 2010 г.                         |
|  | - границы Нижне-Кошелевской термоаномалии |
|  | - опорный гравиметрический профиль        |

На каждом пункте профилей измерялись по три значения поля. Все измерения проводились рейсами, для каждого из которых выбиралась соответствующая точка опорного профиля. Над гравиметром устанавливалась тренога, на которой крепилась геодезическая GPS-антенна, к ней подключалась станция и велась запись. Время записи определялось удаленностью друг от друга GPS-станций. В первом полевом периоде время записи на каждой точке составляло 20 – 30 мин, в следующем полевом сезоне – 60 – 80 мин. Точность привязки пунктов наблюдения составила 3 – 10 см.

### Результаты работ

По результатам площадной микросейсмической съемки построена объемная модель пространственного распределения интенсивности микросейсмического поля (рис. 5).

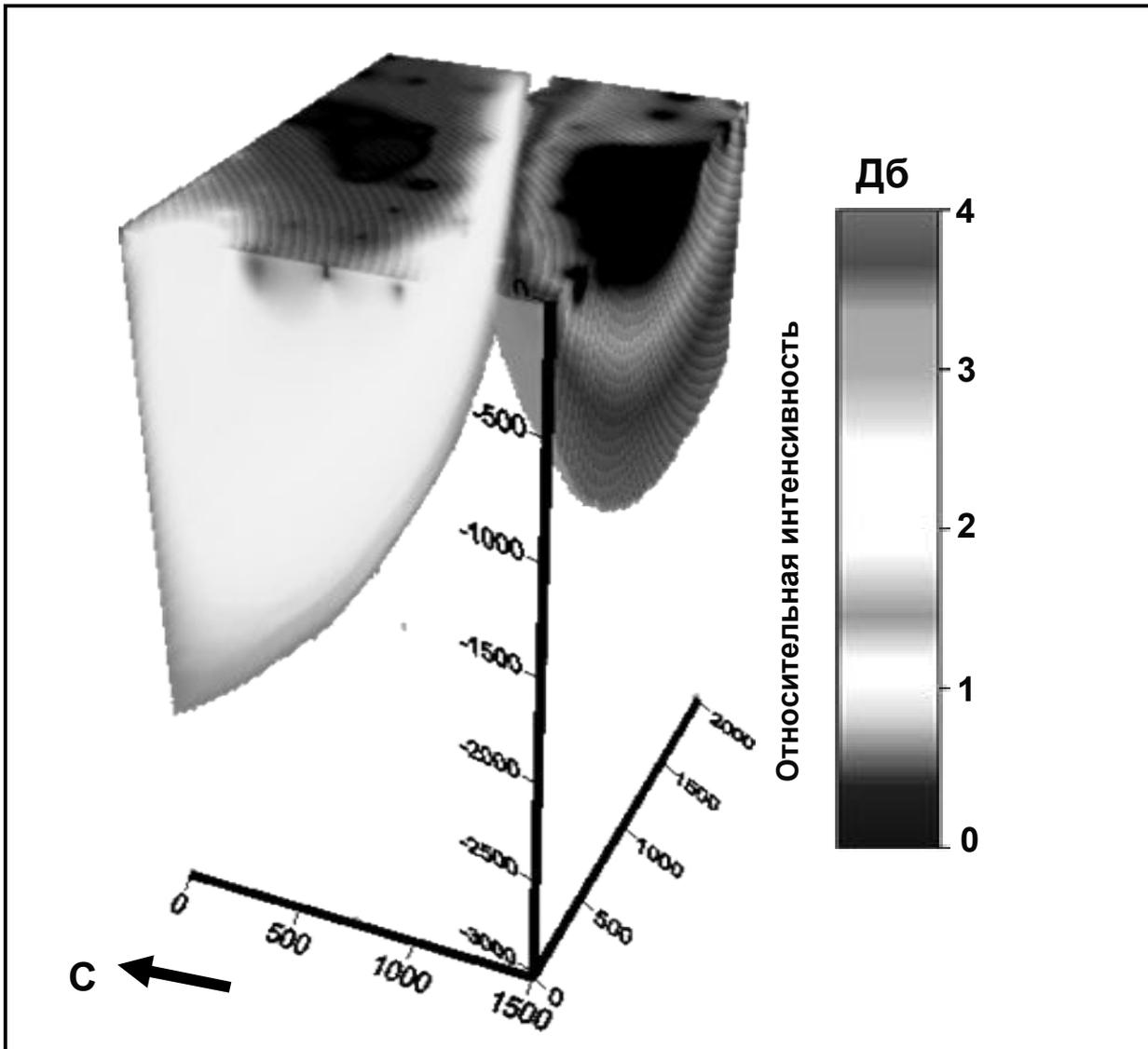


Рис.5. Пространственное распределение интенсивности поля по данным микросейсмического зондирования 2008 г.

На модели четко выделились две контрастные чашеобразные области с четкой границей между ними. Область с более высокой интенсивностью сигнала, расположенная севернее, соответствует низким скоростям прохождения сейсмических волн. К этой области приурочена Нижне-

Кошелевская термоаномалия. Южная область имеет другое строение - низкую относительную интенсивность сигнала (высокие скорости прохождения сейсмических волн).

Этой области соответствуют более консолидированные (плотные, жесткие, вероятно, гидротермально неизменные) породы. С геологической точки зрения разрез северной низкоскоростной области объясняется преобладанием гидротермально измененных пород, как правило, разуплотненных и насыщенных в данном случае паро-газовой смесью.

Граница между этими двумя зонами соответствует субширотному разлому, выделенному ранее по результатам геологической съемки и тематических исследований. На дневной поверхности разлом трассируется ручьем Прямой.

По секущему микросейсмическому профилю построен вертикальный разрез, отражающий распределение относительных скоростей сейсмических волн. Обращает на себя внимание область в южной части разреза, приуроченная непосредственно к самой термоаномалии. Таким образом, глубинное строение Нижне-Кошелевской термоаномалии представляет собой чашеобразную область разуплотненных и паро-водонасыщенных пород до глубины 200 – 300 м, с уходящим на глубину до 2 км каналом. Этот канал, вероятно, служит зоной восходящего конвективного теплового потока [2].

По гравиметрическим данным на самой термоаномалии выявляются скачки поля силы тяжести, связанные с отдельными более мелкими блоками разуплотненных пород гидротермальной системы (рис. 6).

По результатам гравиметрической съемки 2009 и 2010 гг. построена карта аномалий поля силы тяжести в редукции Буге для плотности промежуточного слоя  $2,1 \text{ г/см}^3$ . Эта плотность была выбрана по методу Неттлетона [4]. Также был построен график корреляции поля силы тяжести в редукциях Буге и Фая для плотностей от  $1,8 - 2,6 \text{ г/см}^3$ . Было получено, что коэффициент корреляции минимален, когда плотность промежуточного

слоя соответствует  $2,1 \text{ г/см}^3$ . Эта плотность подтверждается также геологическими данными и соответствует средней плотности пород в районе термоаномалии [1].

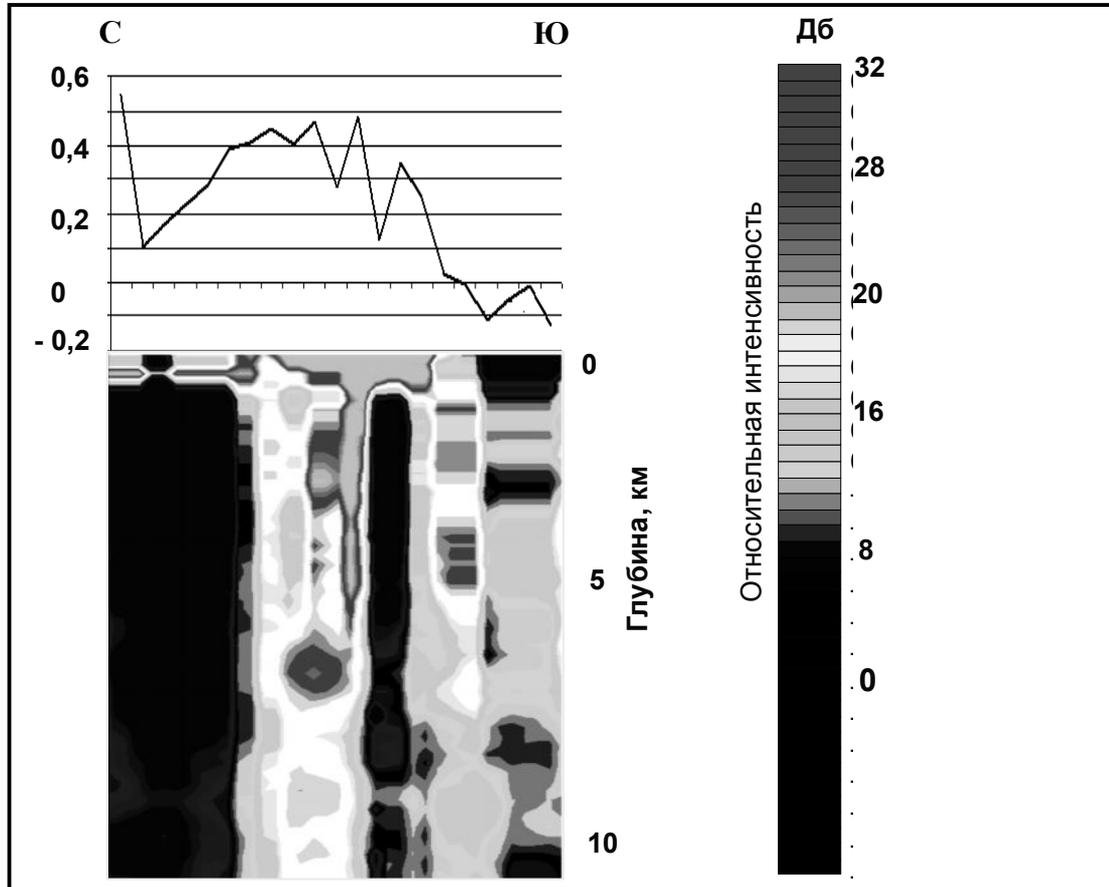


Рис. 6. Сопоставление результатов гравиметрической съемки и микросейсмического зондирования по секущему профилю.

На построенной карте аномального гравитационного поля (рис. 7) выделились две области. Одна область с отрицательными аномалиями силы тяжести в редукции Буге, которой соответствуют разуплотненные горные породы. Другая область с положительными аномалиями силы тяжести в редукции Буге, которой соответствуют более консолидированные (плотные, жесткие) горные породы. Пунктиром показано местоположение гидротермальной разгрузки. Среднеквадратическая погрешность съемки составила  $0,034 \text{ мГал}$ .

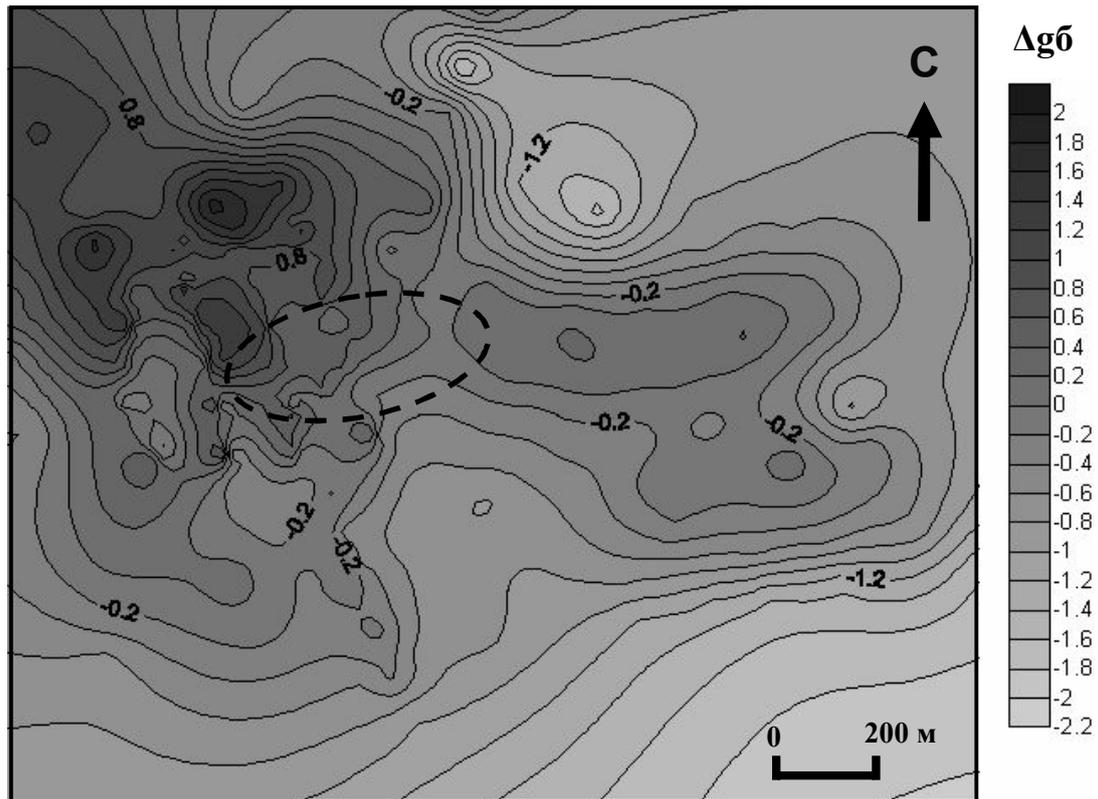


Рис. 7. Карта аномального гравитационного поля в редуции Буге для плотности промежуточного слоя  $2,1 \text{ г/см}^3$ . Сечение изолиний в условных единицах.

По результатам двух методов построено несколько моделей структуры геотермального месторождения с помощью программы расчета гравитационных аномалий  $tg-2z$ , разработанной на кафедре геофизики МГУ. Выбор наиболее вероятной плотностной модели осуществлялся с учетом следующего: модель должна быть как можно проще; графики наблюдаемого и расчетного гравитационных полей должны как можно точнее повторять друг друга (коэффициент корреляции должен быть минимален); построенная плотностная модель не должна противоречить истинным плотностям пород по геологическим данным.

С учетом изложенных выше параметров построена двумерная плотностная модель по секущему профилю (рис. 8). Моделирование проводилось методом подбора расположения, размеров, формы и избыточной плотности (относительно плотности промежуточного слоя) аномалообра-

зующих блоков, с применением программы расчета гравитационных аномалий  $tg-2z$ .

В верхней части изображены графики поля силы тяжести: наблюдаемого (сплошная линия) и расчетного (пунктирная линия) гравитационных полей. Коэффициент корреляции для графиков равен 0.953 мГал. В нижней части изображена блоковая структура со значениями избыточной плотности относительно  $2.1 \text{ г/см}^3$ . Такая блоковая структура выбрана исходя из микросейсмического разреза. Коэффициент корреляции тем меньше, чем больше мелких блоков. Возможное наличие мелких блоков в структуре Нижне-Кошелевского геотермального месторождения, может быть связано, как с первичной неоднородностью геологического разреза, так и высокой степенью гидротермально-метасоматических изменений пород на отдельных участках.

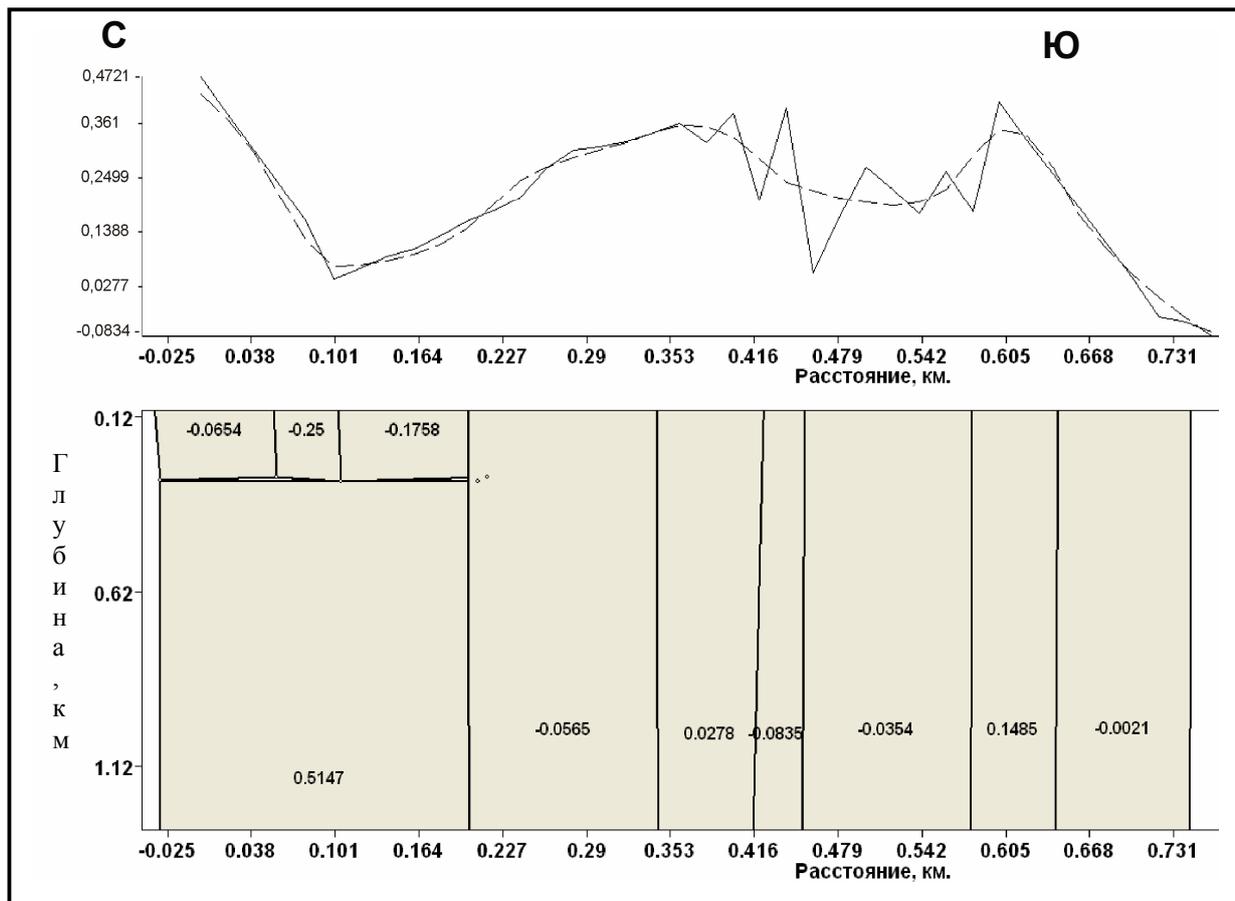


Рис. 8. Двумерная плотностная модель по секущему профилю. Положение профиля показано на рис. 4.

### Выводы

По данным микросейсмического зондирования глубинное строение термоаномалии представляет собой низкоскоростную чашеобразную область до глубины 200 - 300 м с распространяющейся до 2 км зоной интенсивного поглощения сейсмических волн. Эта зона может интерпретироваться как область восходящего потока парогидротерм.

В результате моделирования выделяется одиннадцать блоков. Каждый блок характеризуется значениями избыточных плотностей. Выделяются блоки с избыточной плотностью:  $0,02 \text{ г/см}^3$  (истинная плотностью  $2,12 \text{ г/см}^3$ ),  $0,14 \text{ г/см}^3$  (истинная плотностью  $2,24 \text{ г/см}^3$ ) и  $0,51 \text{ г/см}^3$  (истинная плотностью  $2,61 \text{ г/см}^3$ ). Блоки с дефицитом плотности в диапазоне от  $0,002 \text{ г/см}^3$  (истинная плотность  $2,102 \text{ г/см}^3$ ) до  $0,25 \text{ г/см}^3$  (истинная плотность  $1,85 \text{ г/см}^3$ ). Блоки с дефицитом плотности приурочены к термоаномалии.

Сопоставление результатов, полученных двумя методами, показало, что термоаномалия приурочена к низкоскоростному и разуплотненному блоку пород. Термоаномалия имеет неоднородное строение на глубину и может включать от двух - трех до нескольких блоков пород, различающихся плотностью, паро-водонасыщенностью и др. физическими свойствами.

Данная работа показала высокую эффективность комплексного применения высокоточной гравиразведки и микросейсмического зондирования при изучении структуры земной коры в зонах современной геотермальной активности.

### Благодарности

Авторы глубоко признательны Абкадырову И.Ф., Букатову Ю.Ю. и Рылову Е.С. за непосредственное участие в получении фактических материалов, помощь в обработке данных и обсуждении результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 09-05-00022а, 10-05-00009а).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абкадыров И.Ф., Букатов Ю.Ю. Результаты высокоточных гравиметрических исследований на Нижне-Кошелевской термоаномалии // Природная среда Камчатки // Материалы IX региональной молодежной научной конференции «Природная среда Камчатки». 12 – 13 апреля 2010г. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. 2010. С. 71-80
2. 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 молодежной научной конференции «Природная среда Камчатки». 12 – 13 апреля 2010г. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. 2010. С. 49-60
3. Вакин Е.А., Декусар З.Б., Сережников А.И., Спиченкова М.В. Гидротермы Кошелевского вулканического массива // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 58-84.
4. Гравиразведка. Справочник геофизика // Под ред. Мудрецовоy Е.А., Веселова К.Е. - М.: Недра, 1990. - 587 с.
5. Писарева М.В. Зона природного пара Нижне-Кошелевского геотермального месторождения // Вулканология и сейсмология. 1987. № 2. С. 52-63.
6. Поздеев А.И., Нажалова И.Н. Геология, гидродинамика и нефтегазоносность Кошелевского месторождения парогидротерм, Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2008. № 3. С. 32-45.
7. Руководство по эксплуатации гравиметрическим комплексом CG-5 Avtograd Scintrex. Редакция 1.0, 2007.

## PECULIARITIES OF NIZHNY-KOSHELEVSKY GEOTHERMAL BIRTH'S PLACE'S DEEP STRUCTURE ON THE BASIS OF MICROSEISMIC PROBING'S AND GRAVIMETRY'S DATA

*Feofilaktov S.O., Nuzhdayev I.A.*

Kamchatsky State University names of Vaitys Bering

Last years in frames of South Kamchatka-Kuril expedition the geophysical works are passed on the square of Nizhny-Koshelevsky geothermal place of birth. These works are necessary for studying of deep structure's construction. The structure checks torrent of ascending high temperature steam and gas fluids. Three seismic stations MARS – Lite with three- component seismic primary/sensing elements LE – 3Dlite produced by firm Lennartz were used for micro seismic registration. Gravimetrical observations were carried out with high exact automated Gravimeter Scintrex CG – 5 Autograd (allowing ability during survey approaches 0.001 mGal). In the work the results of gravimetrical survey done during two field seasons are represented. The comparison of these results with micro seismic probing's data is also shown.

*Key words: Nizhny-Koshelevsky thermal anomaly, gravimetrical survey, micro seismic probing, anomalies of weight force's field, relative intensity map, model.*