

УДК 550.312, 528.27

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫСОКОТОЧНЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ НА НИЖНЕ-КОШЕЛЕВСКОЙ
ТЕРМОАНОМАЛИИ

Абкадыров И.Ф., Букатов Ю.Ю.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

Приведены первые результаты высокоточных гравиметрических исследований на Нижне-Кошелевской термальной аномалии (Южная Камчатка). Представлены краткие сведения о геологическом строении района работ. Дано описание аппаратуры и методики гравиметрических наблюдений. Приведены результаты обработки гравиметрических данных в виде карт аномального поля в редукциях Фая и Буге. Дана оценка возможных вариаций плотности горных пород в пределах района.

Ключевые слова: гравиметрия, геотермальные поля

Паужетско-Камбально-Кошелевский геотермальный район расположен на юге Камчатки. Он охватывает территорию от Берегового хребта на востоке до побережья Охотского моря на западе и от бассейна р. Голыгиной на севере до депрессии р. Камбальной на юге. Фундаментом района служит миоцен-плиоценовая толща андезитовых лав с прослоями туфов и туфобрекчий, перекрывающая вулканогенно-осадочные отложения среднего миоцена. Породы фундамента включают в себя золотополиметаллические рудопроявления, что, в целом, типично для Камчатки. В районе расположены действующие вулканы Желтовский, Ильинский, Камбальный и Кошелевский. Схема геологического строения района Нижне-Кошелевской термоаномалии по данным [1] представлена на рис.1.

В период с 30 июля по 14 августа 2009 г. в районе Нижне-Кошелевской термальной аномалии были проведены площадные высокоточные гравиметрические исследования.

Основными задачами проводимых исследований являлось:

- выявление возможностей высокоточных гравиметрических исследований при изучении современных геотермальных полей;

- выявление структур, контролирующих геотермальные процессы в пределах Нижне-Кошелевской термальной аномалии;
- получение информации о вариациях плотности горных пород в пределах геотермального поля.

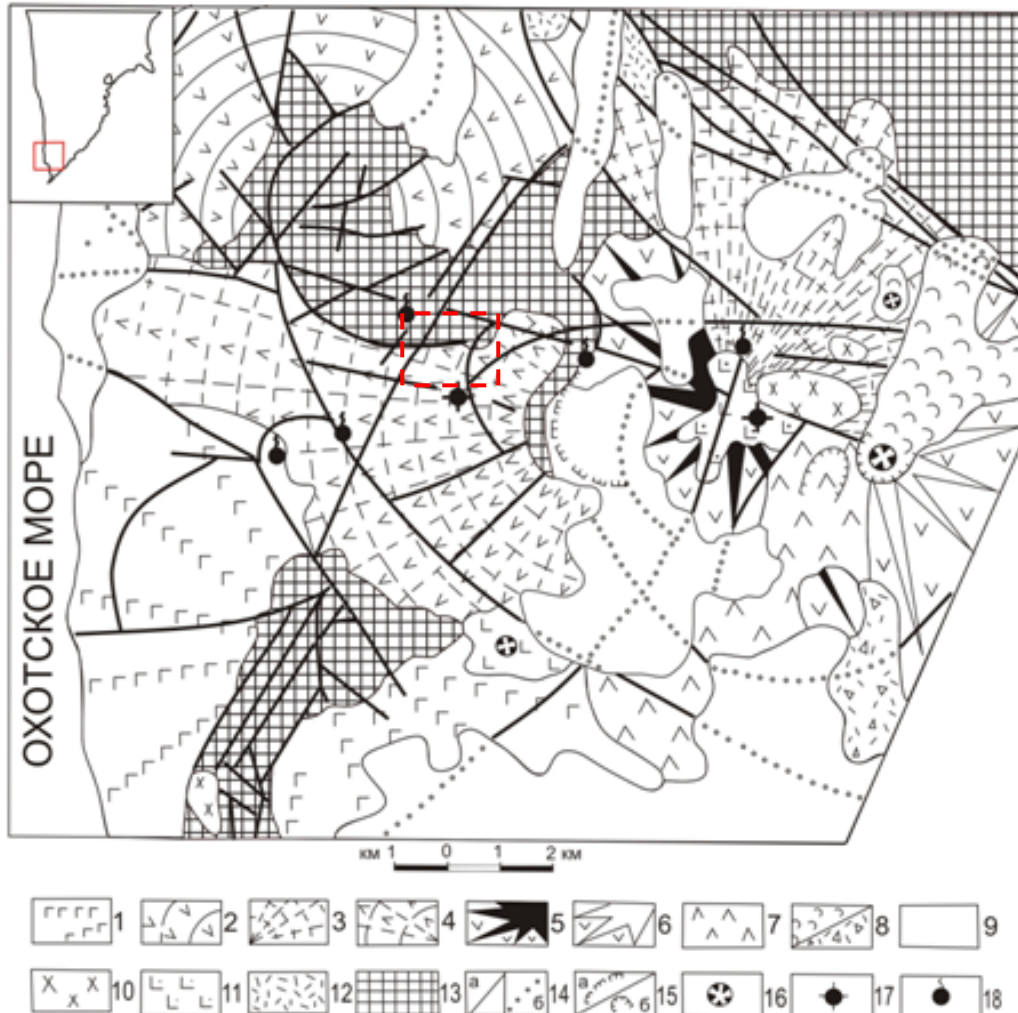


Рис. 1. Схема геологического строения района работ (по данным [1]).

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 (αQII); 4 – вулкан Западный ($\alpha QIII$); 5 – вулкан 1545 (Валентин) ($\alpha Q2III$); 6 – вулкан Восточный ($\beta QIII-IV$); 7 – вулкан Центральный ($\alpha\beta QIII-IV$); 8 – образования Активного кратера: а - лавовые потоки (βQIV), б - отложения направленного взрыва (QIV); 9 – рыхлые отложения различного генезиса ($QII-QIV$); 10 – экструзии голоценового возраста: а) андезитов-дацитов и дацитов ($\alpha\gamma QIV$), б) базальтов (βQIV); 12 - субвулканические интрузии долеритов ($\beta QIII-IV$); 13 – дочетвертичные эффузивы ($\alpha N1-N2$); 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. Пунктирным прямоугольником отмечено место проведения работ.

Гравиметрические наблюдения выполнялись высокоточным автоматизированным гравиметром Scintrex CG-5 Autograv. Этот прибор представляет собой автоматический микропроцессорный гравиметр без необходимости переустановки (его диапазон измерений превышает 8000 мГал), а разрешающая способность при снятии показаний достигает 0,001 мГал. Показания в системе Autograv получаются путем постоянного усреднения замеров, взятых в течение определенного цикла. Чувствительная система гравиметра представляет собой пружинные весы из плавленного кварца и является неастизированной. Гравитационная сила, приложенная к пробной массе, уравнивается пружиной, а ее вариации во времени компенсируются электростатической силой. Так как датчик изготовлен из немагнитного плавленного кварца, система Autograv не подвержена воздействию изменений магнитного поля (если только они не превышают в десять раз величину магнитного поля Земли).

В системе Autograv реализованы датчики угла наклона гравиметра, которые позволяют вводить автоматическую корректировку данных за наклон прибора. Система автоматической корректировки данных также вводит поправку за лунно-солнечное притяжение, и, кроме того, имеет прогрессивную функцию отбраковки зашумленных показаний и фильтр сейсмических помех FIR.

Защита от изменений внешней температуры и атмосферного давления достигается герметизацией чувствительного элемента системы Autograv в вакуумной камере с температурной стабилизацией. Малое смещение нуля-пункта позволяет произвести точную долговременную оценку смещения датчика. [2].

Высокоточные гравиметрические исследования требуют высокой точности геодезической привязки пунктов наблюдения. Для геодезического обеспечения работ использовались GPS антенны Trimble и Topcon. GPS антенна Topcon использовалась как базовая станция, антенна Trimble ис-

пользовалась как рабочая. Эта система позволила достичь необходимой точности определения высот и координат пунктов наблюдения.

В районе исследований было намечено 10 профилей. Протяженность каждого профиля составляла около 1 км. Расстояние между профилями – 100-150 м. Шаг точек наблюдения по профилю составлял около 100 метров. Район съемки включал Нижнее-Кошелевскую термоаномалию и ее окрестности. Перпендикулярно рабочим профилям был заложен опорный профиль, на котором измерения проводились неоднократно с целью учета сползания нуля-пункта гравиметра.

На каждом пункте профиля расчищалась площадка диаметром около одного метра, на которой устанавливался гравиметр. Над гравиметром устанавливалась тренога, на которой крепилась GPS-станция. Гравиметр выставлялся по астрономической вертикали с помощью уровня, выстаивался в течение нескольких минут, затем проводились измерения. На каждом пункте измерялись по три значения. Время одного цикла измерений составляло 1 минуту.

Обработка полученных данных проводилась в несколько этапов. На первом этапе все полученные значения уравнивались в единую сеть. Производился расчет координат и высот всех пунктов наблюдения.

Таким образом, был получен единый каталог всех измеренных значений гравитационного поля с их пространственно-временной привязкой. На этом этапе также рассчитывалась точность съемки и точность определения высот пунктов наблюдения. Точность определения высот пунктов наблюдения составляла 3-7 см. Среднеквадратичная ошибка гравиметрической съемки на полигоне составила 0,021 мГал.

При решении геологических задач основной интерес представляют локальные гравитационные аномалии, для вычисления которых точных абсолютных значений гравитационного поля не требуется. Для получения «абсолютных» измеренных значений гравитационного поля к относительным измеренным значениям прибавлялась некоторая постоянная для всего

района величина, значение которой выбиралось исходя из величины нормального поля, средней высоты над уровнем моря и предполагаемой мощности земной коры для рассматриваемого района.

На следующих этапах обработки производился расчет и ввод поправок Фая и Буге. Поправка за свободный воздух (поправка Фая) учитывает высоту пункта наблюдения над поверхностью геоида и рассчитывается по формуле (в мГал):

$$\delta g_{\text{св.возд}} = 0,3086h$$

где h — высота пункта наблюдения над уровнем моря (поверхностью геоида), в м.

Аномальное гравитационное поле в редукции Фая рассчитывается по формуле:

$$\Delta g_{\phi} = g_{\text{набл}} - \gamma_0 + \delta g_{\text{св.возд}}$$

где $g_{\text{набл}}$ - наблюденное поле, γ_0 - нормальное значение ускорения силы тяжести в пункте наблюдения.

Нормальное значение ускорения силы тяжести рассчитывалось для каждой точки полигона по формуле:

$$\gamma_0 = g_{\text{норм}} = g_{\text{э}} (1 + 0,005302 \cdot \sin^2 \varphi - 0,000007 \cdot \sin^2 2\varphi)$$

где $g_{\text{э}}$ — среднее значение нормального ускорения силы тяжести на экваторе Земли, φ - широта пункта наблюдения [3,4].

Результатом этого этапа обработки является карта аномального гравитационного поля в редукции Фая (рис. 2). Значения изолиний гравитационного поля на этой карте приведены в условных единицах.

Для исключения влияния масс, расположенных между поверхностью геоида и точками наблюдения, вводят поправку за промежуточный слой (поправку Буге). В случае «спокойного» рельефа местности, эту поправку вычисляют по формуле:

$$\delta g_{\text{б}} = -0,0418 \sigma h,$$

где σ — средняя плотность пород промежуточного слоя (в г/см³); h — высота пункта наблюдения над поверхностью геоида (в м).

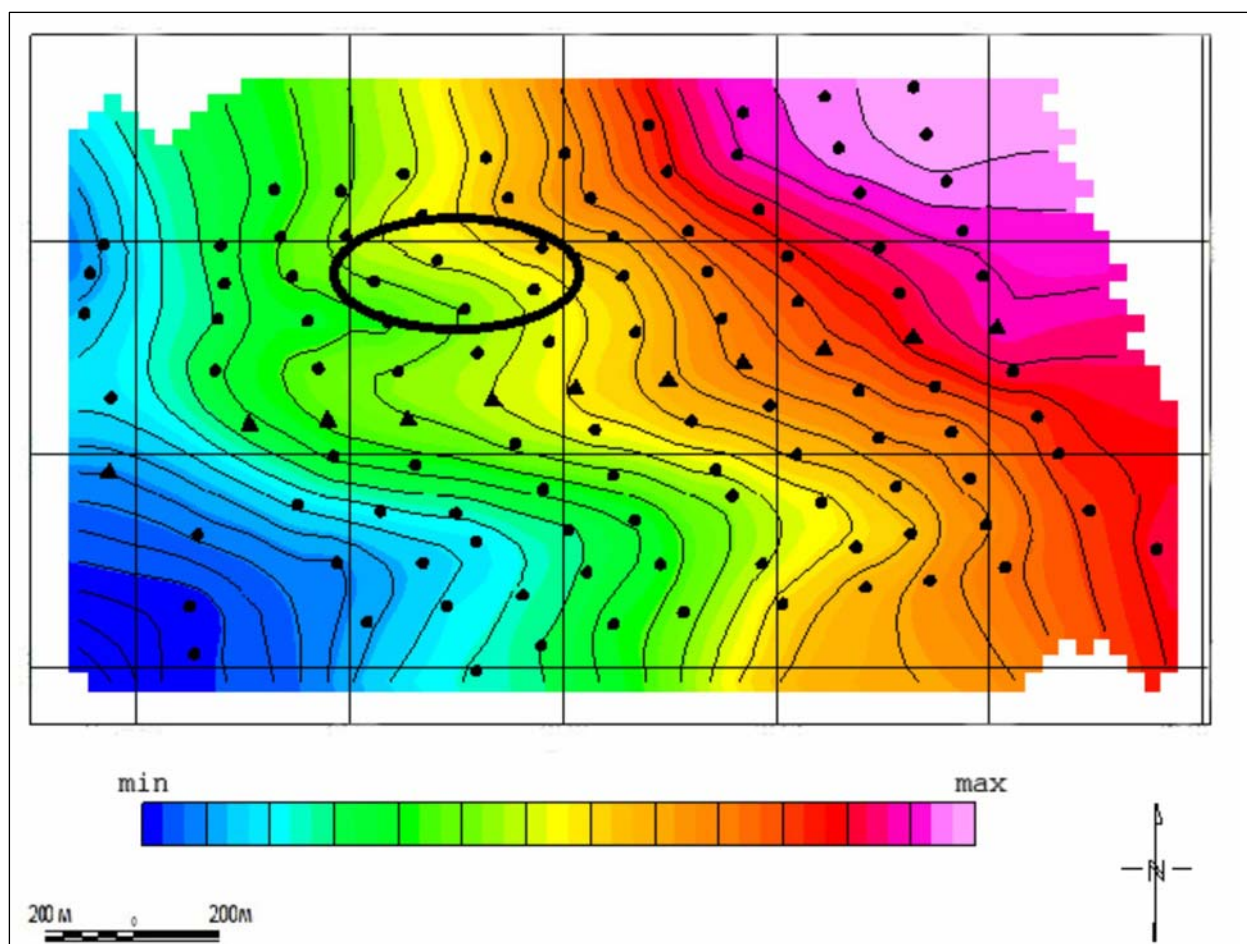


Рис 2. Карта аномального гравитационного поля в редукции Фая в районе Нижнее-Кошелевской термоаномалии (в условных единицах). Эллипсом показано положение термоаномалии, точками отмечены пункты наблюдения, треугольниками выделены пункты опорного профиля.

При введении соответствующих поправок, аномалия Буге (Δg_B) представляет собой разность наблюдаемого и теоретического полей ускорения силы тяжести:

$$\Delta g_B = g_{\text{НАБЛ}} - \gamma_0 + \delta g_{\text{СВ.ВОЗД}} + \delta g_B,$$

В отсутствии экспериментальных данных о средней плотности горных пород в районе исследований, плотность промежуточного слоя при расчете аномалий Буге принимают равной $2,67 \text{ г/см}^3$ — средней плотности горных пород земной коры [3, 4]. В данном случае средняя плотность горных пород по району исследований была известна по геологическим данным и данным бурения и составляла около $2,1 \text{ г/см}^3$ [5]. На рис. 3 приведена карта

аномального гравитационного поля в редукции Буге, рассчитанная при плотности пород промежуточного слоя $2,1 \text{ г/см}^3$.

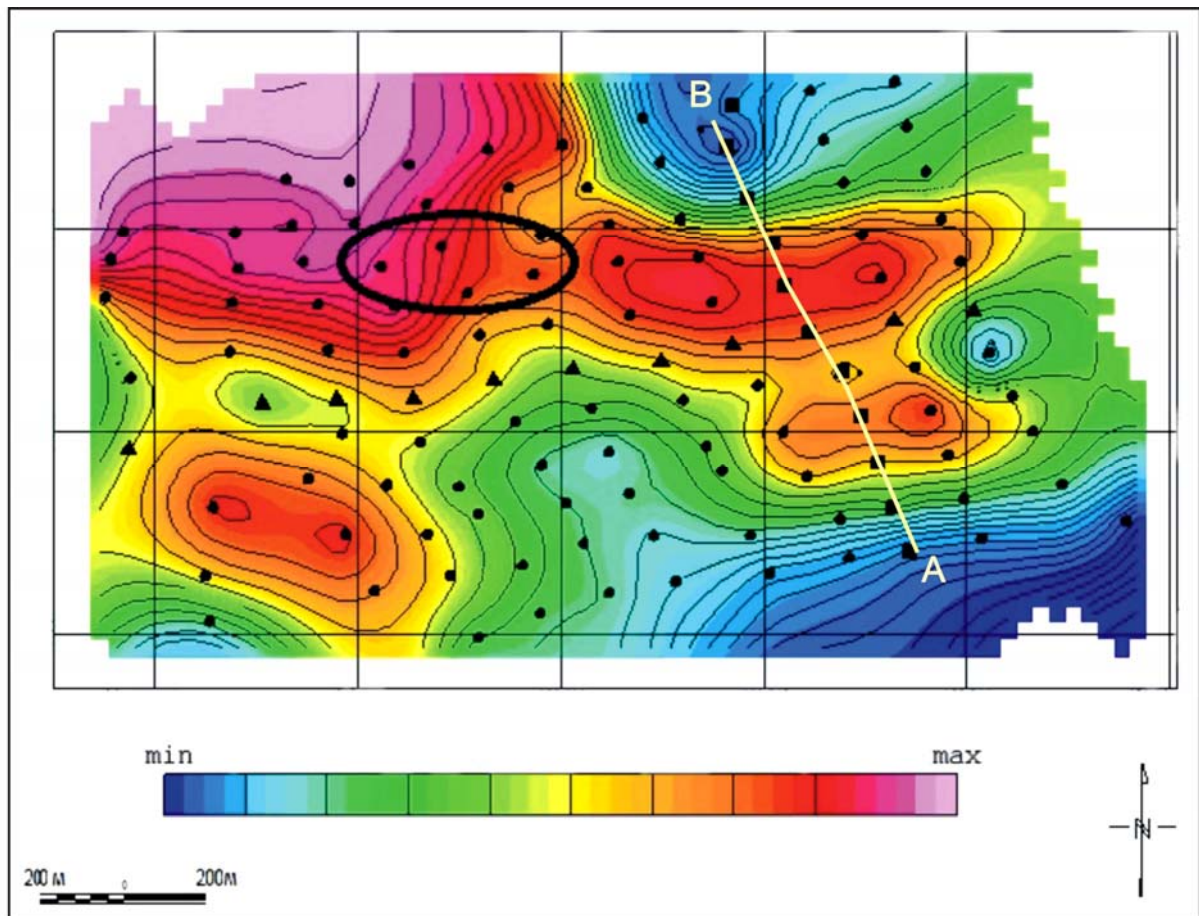


Рис. 3. Карта аномального гравитационного поля в редукции Буге в районе Нижне-Кошелевской термоаномалии. Плотность промежуточного слоя $2,1 \text{ г/см}^3$. Эллипсом показано положение термоаномалии, точками отмечены рядовые пункты наблюдения, треугольниками выделены пункты опорного профиля, квадратами - пункты наблюдения профиля А-В (см. рис.4).

В качестве дополнительного критерия правильности выбора плотности промежуточного слоя может служить отсутствие корреляции между аномальными гравитационными полями в редукциях Фая и Буге, представленных на рис. 2 и рис. 3.

Полученные значения аномального гравитационного поля в редукции Буге изменяются по площади в пределах $2,6 \text{ мГал}$, при этом выделяется довольно сложная система сопряженных гравитационных аномалий различных простираний, что свидетельствует о наличии плотностных неоднородностей в верхней части разреза. Преобладающее простирание ано-

малый - субширотное, соответствующее простиранию выделенных здесь по геологическим данным тектонических нарушений.

Для получения представлений о вариациях плотности горных пород в пределах данного района, было проведено двумерное плотностное моделирование по профилю А-В (см. рис. 3), ориентированному вкрест системы гравитационных аномалий, вытянутых в субширотном направлении. Моделирование проводилось методом подбора расположения, размеров, формы и избыточной плотности (относительно плотности промежуточного слоя) аномалообразующих блоков, с применением программы расчета гравитационных аномалий $tg2z$, разработанной на кафедре геофизики МГУ. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

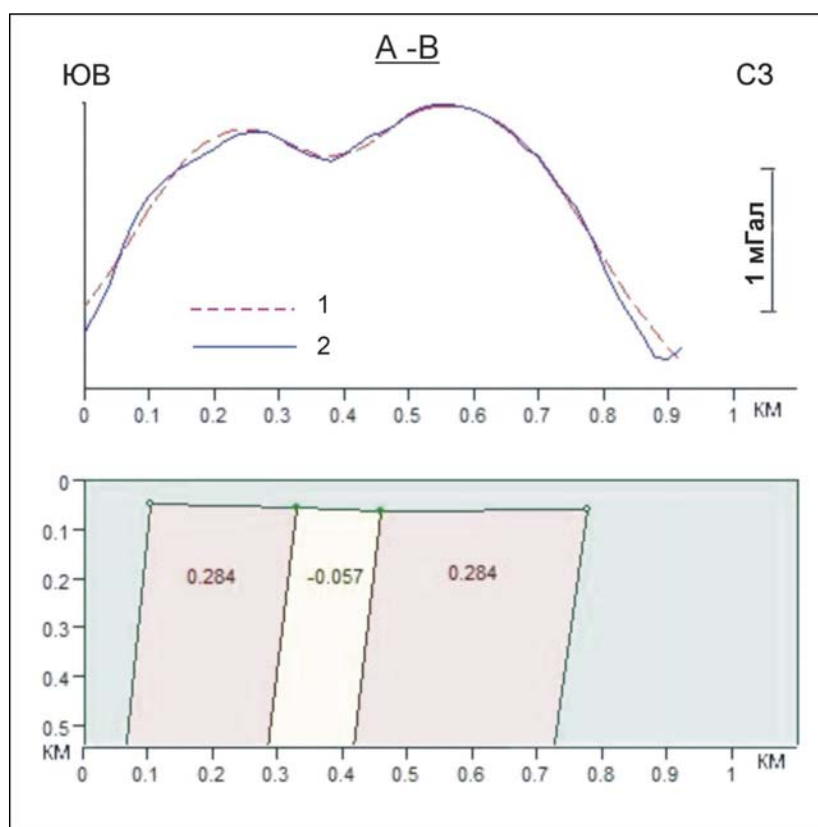


Рис. 4. Двухмерная плотностная модель по профилю А-В (рис. 3). В верхней части рисунка показаны графики рассчитанного (1) и наблюдаемого (2) аномального гравитационного поля. В нижней части рисунка приведена плотностная модель с указанием значений избыточной плотности в $г/см^3$.

Известно, что обратные задачи гравиразведки не решаются однозначно, и, конечно, существует множество других вариантов плотностных

моделей, соответствующих наблюдаемым значениям гравитационного поля по профилю А-В. При выборе наиболее вероятной плотностной модели из множества других авторы руководствовались тремя критериями: 1) максимально-возможной простотой модели, 2) наилучшим совпадением графиков наблюдаемого и рассчитанного гравитационных полей и 3) реальными значениями избыточной плотности, не противоречащими геологическим данным.

В данном случае, полученная плотностная модель представлена двумя крутопадающими блоками с избыточной плотностью около 0.284 г/см^3 (истинная плотность 2.384 г/см^3), разделенных слабо разуплотненной зоной с дефицитом плотности -0.057 г/см^3 (истинная плотность 2.043 г/см^3). Такая модель может иметь довольно простой вариант геологической интерпретации. Вытянутые в субширотном направлении блоки отличаются повышенной плотностью за счет серии магматических тел (даек), внедрившихся по системе крутопадающих в ЮВ направлении тектонических нарушений субширотного простирания. Формирование слабо разуплотненной зоны между блоками может быть связано с незначительным (на 0.057 г/см^3) уменьшением плотности вмещающих горных пород под воздействием геотермальных процессов, сопутствующих внедрению магматических тел.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы.

1. Высокоточные гравиметры Scintrex CG-5 Autograv в комплексе с современными средствами спутниковой привязки позволяют проводить детальные гравиметрические съемки со среднеквадратичной ошибкой порядка первых сотых долей мГал. При этом уверенно выделяются гравитационные аномалии интенсивностью более десятых долей мГал.

2. Объектами высокоточных гравиметрических исследований могут быть геологические тела, весьма незначительно (на сотые доли г/см^3) отличающиеся по плотности от вмещающих пород.

3. На примере гравиметрических исследований, проведенных в районе Нижнее-Кошелевской термоаномалии, можно констатировать, что в пределах современных геотермальных полей интенсивность гравитационных аномалий невелика, как правило - первые мГалы. Такие аномалии могут создаваться плотностными неоднородностями в десятые доли г/см³ в верхней части геологического разреза.

Авторы выражают благодарность научному руководителю д.г.-м.н. Селиверстову Н.И. и начальнику Южно-Камчатской экспедиции Института вулканологии и сейсмологии д.г.-м.н. Рычагову С.Н. за помощь и консультации.

Работа выполнена в рамках проекта ДВО РАН № 09-III-A-08-430.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вакин, Е.А., Декусар, З.Б., Сержников, А.И., Спиченкова, М.В. Гидротермы Кошелевского вулканического массива // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. 1976. С. 57-78.
2. Руководство по эксплуатации гравиметрическим комплексом CG-5 Avtograd Scintrex. Редакция 1.0, 2007.
3. Геофизические методы исследования // Учебное пособие // Под ред. Селиверстова Н. И.: Петропавловск-Камчатский. 2004. 232 с.
4. Миронов В. С. Курс гравиразведки. Л.,: Недра, 1972. 512 с.
5. Белоусов В. И. Геология геотермальных полей в областях современного вулканизма. Н., 1978 г. 186 с.

RESULTS FROM HIGHLY-PRECISE GRAVIMETRIC RESEARCH AT NIZHNE-KOSHELEVSKY THERMAL ANOMALY

Abkadyrov I.F., Bukatov Yu.Yu.

Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS

The article presents primary results of highly-precise gravimetric research at Nizhne-Koshelevsky thermal anomaly, Southern Kamchatka, and provides summary on geologic structure of the study area. Besides, the article describes the tools and methods used for gravimetric monitoring. The processed gravimetric data resulted in creation of map of anomalous field in Free Air and Bouguer reductions.

Keywords: gravimetry, thermal fields