

УДК 550.312, 528.27

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫСОКОТОЧНЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ВЕРХНЕ-ПАУЖЕТСКОМ ТЕРМАЛЬНОМ ПОЛЕ

¹*Букатов Ю.Ю.,¹ Абкадыров И.Ф. (аспиранты),
²Нуждаев И.А.,² Рылов Е.С.,² Феофилактов С.О. (5 курс)*

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН*

² *Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга*

Приведены первые результаты высокоточных гравиметрических исследований на Верхне-Паужетском термальном поле (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. Голыгинной 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 золото-полиметаллические рудопроявления, что, в целом, типично для Камчатки. В районе расположены действующие вулканы Желтовский, Ильинский, Камбальный и Кошелевский. Геологический разрез пород по данным [4] представлен на рис. 1.

В августе 2010 г. в районе Верхне-Паужетского термального поля были проведены площадные высокоточные гравиметрические исследования.

Основными задачами проводимых исследований являлось:

- уточнение геологического строения Верхне-Паужетского термального поля;

- получение информации об изменении физических свойств горных пород в пределах геологических структур контролирующих восходящие потоки термальных вод.

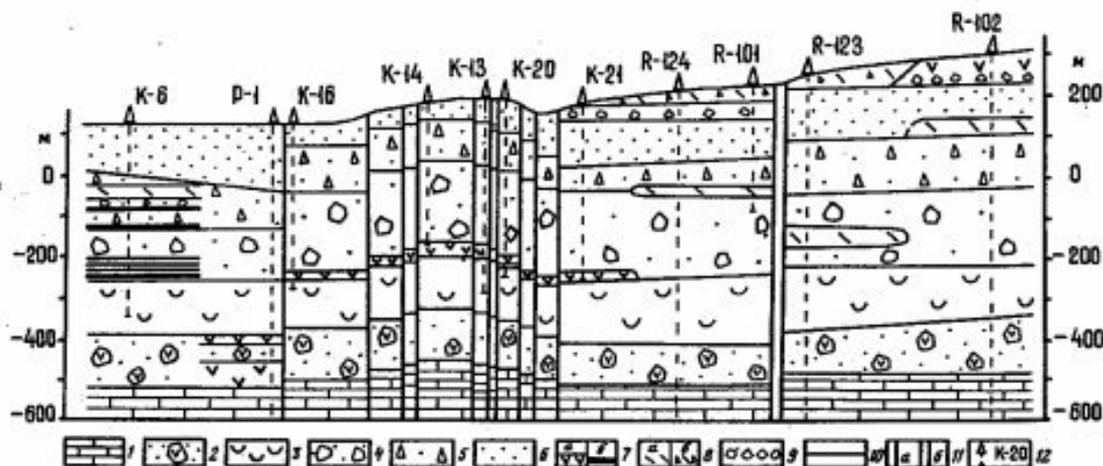


Рис. 1. Геологический разрез Паужетского геотермального месторождения с неотектоническим поднятием Верхнего термального поля (в центре схемы). По данным [4].

1 - вулканомиктовые песчаники основания разреза, анавгайская серия; 2 - агломератовые туфы (туфобрекчии) андезито-базальтового состава, алнейская серия; 3 - риолитовые кристаллолитовитрокластические псефитовые туфы, голыгинская свита; 4 - грубо обломочные литовитрокластические туфы андезитового состава, нижнепаужетская подсвита; 5 - псефитовые туфы андезитодацитового состава, среднепаужетская подсвита; 6 - туфогенно-осадочные отложения дацитового, андезитодацитового состава, верхнепаужетская подсвита; 7 - андезиты и андезитобазальты предположительно плиоцено-нижнечетвертичного возраста; 8 - средне-верхнечетвертичные экструзии (а) и лавы (б) дацитов; 9 - лавобрекчии оснований потоков лав и краевых частей экструзивных тел; 10 - литологические и интрузивные границы; 11 - тектонические нарушения: а - разломы, б - зоны разломов; 12 - поисковые и разведочные скважины.

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 получают путем постоянного усреднения замеров, взятых в течение определенного цикла. Чувствительная система гравиметра представляет собой пружинные весы из плавленого кварца и является неастирированной. Гравитационная сила, приложенная к пробной мас-

се, уравнивается пружиной, а ее вариации во времени компенсируются электростатической силой. Так как датчик изготовлен из немагнитного плавленого кварца, система Autograv не подвержена воздействию изменений магнитного поля (если только они на порядок не превышают 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. [3].

Высокоточные гравиметрические исследования требуют высокой точности геодезической привязки пунктов наблюдения. Для геодезического обеспечения работ использовалась GPS приемник Trimble с антенной Topcon. Базовой станцией являлась сейсмостанция Паужетка, приемник Trimble использовалась как рабочая станция. Эта система позволила достичь необходимой точности определения высот и координат пунктов наблюдения.

В районе исследований было намечено 8 профилей. Протяженность каждого профиля составляла около 100 метров. Расстояние между профилями – 20 метров. Шаг точек наблюдения по профилю составлял около 10 метров. Район съемки включал Верхне-Паужетскую термоаномалию. Для оценки ошибки измерения было повторно отработано 15 % от общего числа точек. Для учета сползания нуля-пункта использовалась контрольная точка, на которой измерения проводились с интервалом в 1 час. 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 составила 10 сантиметров. Среднеквадратичная ошибка гравиметрической съемки на полигоне составила 0,027 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 $g_{\text{набл}}$ - наблюдаемое поле, γ_0 - нормально ускорение силы тяжести в пункте наблюдения.

Нормальное значение ускорения силы тяжести рассчитывалось для каждой точки профиля 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:

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

При введении соответствующих поправок, аномалия Буге ($\Delta g_{\text{Б}}$) представляет собой разность наблюдаемого и теоретического полей ускорения силы тяжести:

$$\Delta g_{\text{Б}} = g_{\text{НАБЛ}} - \gamma_0 + \delta g_{\text{св.возд}} + \delta g_{\text{Б}}$$

В отсутствии экспериментальных данных о средней плотности горных пород в районе исследований, плотность промежуточного слоя при

расчете аномалий Буге обычно принимают равной $2,67 \text{ г/см}^3$ — средней плотности горных пород земной коры [2, 5]. В данном случае средняя плотность горных пород по району исследований была известна по геологическим данным и данным бурения и составляла около $1,9 \text{ г/см}^3$ [1]. На рис. 3 приведена карта аномального гравитационного поля в редукции Буге, рассчитанная при плотности пород промежуточного слоя $1,9 \text{ г/см}^3$.

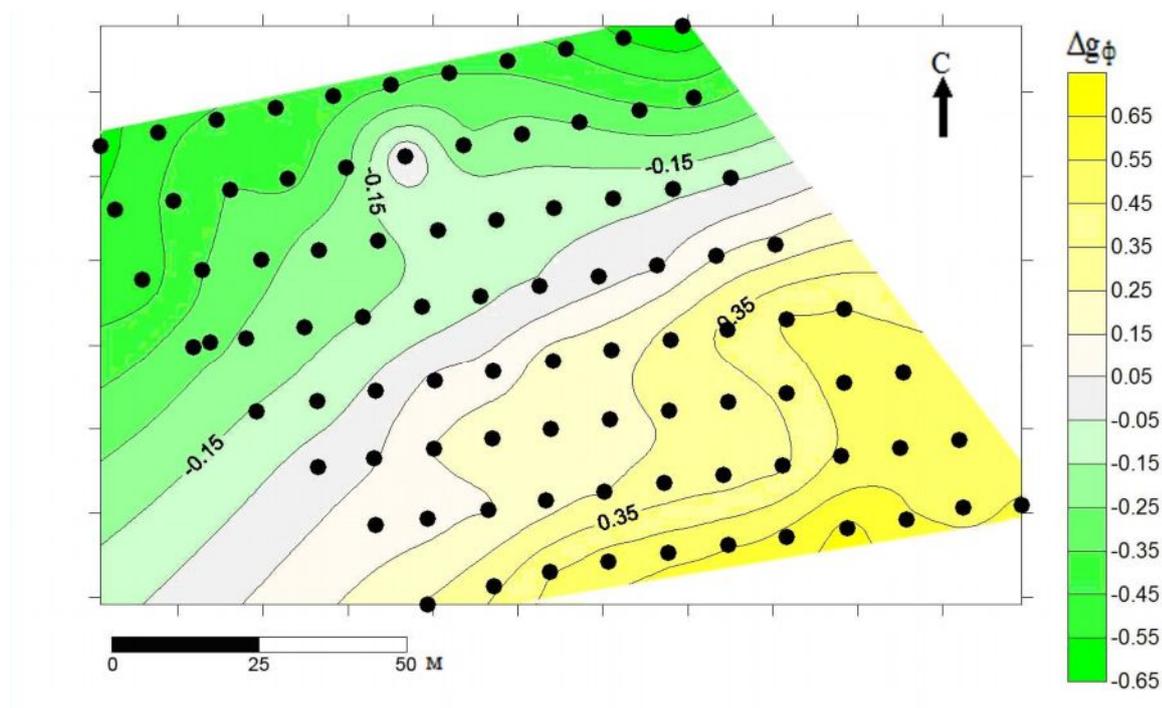


Рис 2. Карта аномального гравитационного поля в редукции Фая (в условных единицах) в районе Верхне-Паужетской термоаномалии.

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.

Для получения представлений о вариациях плотности горных пород в пределах данного района, было проведено двумерное плотностное моделирование по профилю А-В (см. рис. 3).

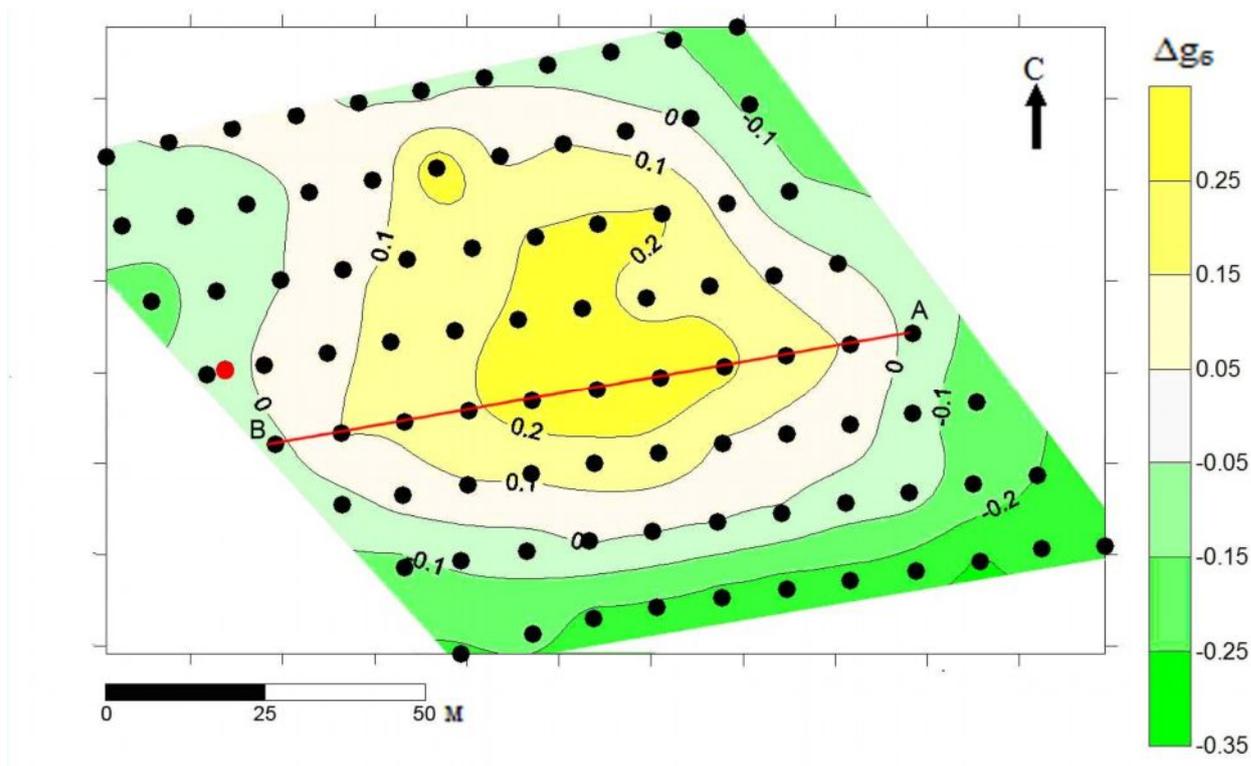


Рис. 3. Карта аномального гравитационного поля в редукции Буге (в условных единицах) в районе Верхне-Паужетской термоаномалии. Плотность промежуточного слоя $1,90 \text{ г/см}^3$. Черными точками отмечены рядовые пункты наблюдения, красной точкой отмечен контрольный пункт.

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

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 плотности, не противоречащими фактическим данным.

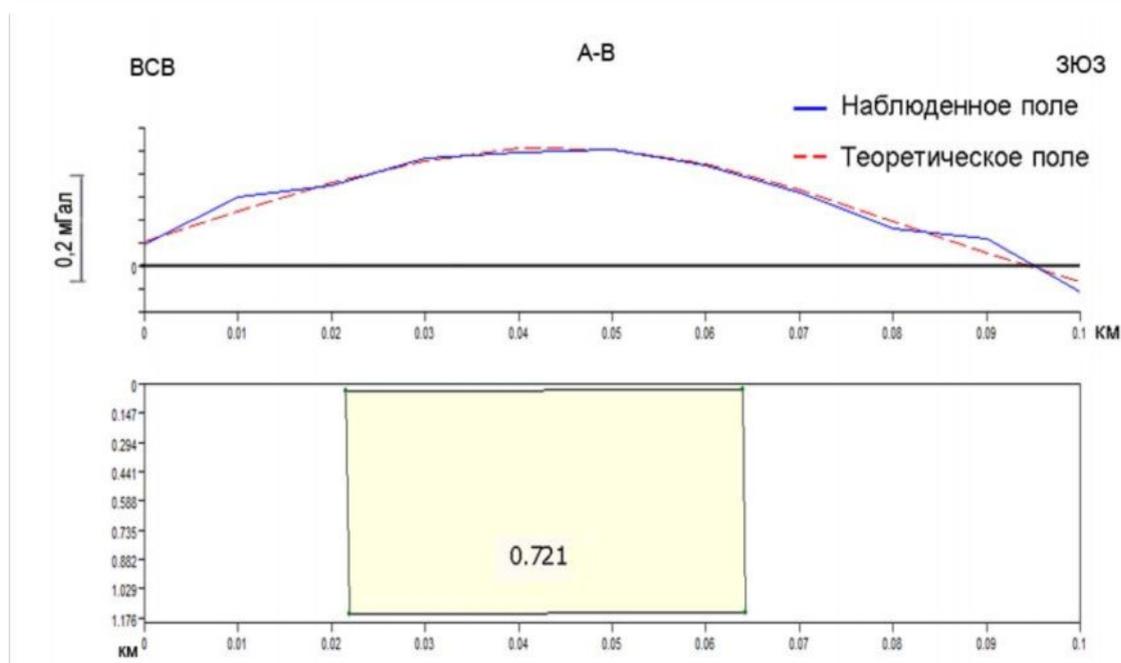


Рис. 4. Двухмерная плотностная модель по профилю А-В (рис. 3). В верхней части рисунка показаны графики рассчитанного и наблюдаемого аномального гравитационного поля. В нижней части рисунка приведена плотностная модель с указанием значений избыточной плотности в г/см^3 .

В данном случае, полученная плотностная модель представлена одним блоком с избыточной плотностью около 0.721 г/см^3 (истинная плотность $2,621 \text{ г/см}^3$), Такая модель может иметь довольно простой вариант геологической интерпретации.

По геологическим данным [4] полученный блок соответствует поднятию Верхне-Паужетского термального поля. По бортам этого поднятия происходит питание гидротермальной системы за счет перетекания термальных вод из нижнего водоносного горизонта на поверхность.

Термальные проявления на поверхности расположены по периферии исследуемой площади. По результатам гравиметрических данных, зоны с отрицательными значениями аномального гравитационного поля в редукции Буге приурочены к термальным проявлениям. Отрицательные значения аномального гравитационного поля в редукции Буге свидетельствуют о том что в этих зонах разуплотненные горные породы, что может быть связано с расположенным здесь питающей системы геотермальных проявлений.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. В центральной части изученного участка выделяется изометричный в плане блок с повышенным значением плотности ($2,62 \text{ г/см}^3$), по сравнению с вмещающими породами ($1,90 \text{ г/см}^3$).
2. Судя по расположению термальных выходов, питание гидротермальной системы происходит по периферии выделенного блока.

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусов В. И. Геология геотермальных полей в областях современного вулканизма. Н., 1978 г. 186 с.
2. Геофизические методы исследования // Учебное пособие // Под ред. Селиверстова Н.И: Петропавловск-Камчатский. 2004. 232 с.
3. Руководство по эксплуатации гравиметрическим комплексом CG-5 Avtograd Scintrex. Редакция 1.0, 2007.
4. Рычагов С.Н., Жатнуев Н.С., Коробов А.Д. и др. Структура гидротермальной системы М., Наука, 1993.-298 с.
5. Миронов В. С. Курс гравиразведки. Л., Недра, 1972. 512 с.

RESULTS FROM HIGHLY-PRECISE GRAVIMETRIC RESEARCH AT
VERKHNE-PAUZHETSKOE THERMAL FIELD

Bukatov Yu.Yu., Abkadyrov I.F., Nuzhdayev I.A., Rylov E.S., Feofilakto S.O.v

Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS

Kamchatka Vitus Bering State University

The article presents primary results from highly-precise gravimetric research at Verkhne-Pauzhetskoe 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