

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ГРАВИТАЦИОННЫХ АНОМАЛИЙ

© 2026 А.С. Долгаль

Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия, 614007; e-mail: dolgal@mi-perm.ru

Поступила в редакцию 01.08.2026; после доработки 23.08.2026; принята в печать 25.09.2026

На практическом примере рассматриваются различные схемы пространственного расположения точечных масс при истокообразной аппроксимации дискретных значений аномального гравитационного поля на фрагменте сферообразной Земли. В качестве исходных данных использовались глобальные модели гравитационного поля Земли WHU-CASM-UGM2025 и рельефа земной поверхности GTOPO30. Площадь исследований размером ~2.4 млн км² ограничена координатами 50°–70° с.ш., 150°–170° в.д. В процессе моделирования применялись один или два уровня глубин размещения эквивалентных источников. Информация о наблюдаемом поле и рельефе земной поверхности задавалась либо только для площади исследований, либо дополнялась данными по обрамляющей ее территории. Решения систем уравнений осуществлялось прямыми методами, обеспечивающими точность аппроксимации не ниже 10⁻⁹ мГал. Приводятся результаты 8 вычислительных экспериментов по пересчету аномалий силы тяжести в редукции Буге в верхнее полупространство. Установлено, что отсутствие сведений о поле за пределами области исследований приводит к появлению артефактов при вычислении трансформант. Даны рекомендации по повышению достоверности результатов метода эквивалентного источника.

Ключевые слова: гравитационное поле, аппроксимация, эквивалентные источники, трансформация, вычислительный эксперимент.

ВВЕДЕНИЕ

Метод эквивалентного источника базируется на приближении наблюдаемого гравитационного поля теоретическим полем, представленным в виде системы потенциальных функций, отвечающих влиянию элементарных масс (Долгаль и др., 2022). Далее будем рассматривать моделирование аномалий силы тяжести в редукции Буге на фрагменте сферообразной Земли. По классификации В.Н. Страхова речь пойдет о региональном варианте линейных аналитических аппроксимаций, который применяется для сравнительно больших площадей размером 10⁵–10⁶ км² и более (Степанова и др., 2026; Страхов и др., 2009). В этом случае в качестве модели Земли используется сфера Каврайского с радиусом 6372.9 км, выполняется переход от геодезических координат (широты B и долготы L) к сферическим $\Sigma\phi R$, а аномалии силы тяжести отождествляются с 1-й радиальной производной

гравитационного потенциала V_R (Долгаль и др., 2023). Значения аппроксимирующих масс $\mathbf{m}$ определяются путем решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\mathbf{G}\mathbf{m} = \mathbf{V}_R, \quad (1)$$

где $\mathbf{G}$ — матрица значений гравитационных эффектов V_R для точечного источника с единичной массой ($m = 1$), $\mathbf{V}_R$ — вектор наблюдаемых аномалий силы тяжести.

Имеются многочисленные примеры, свидетельствующие о том, что разные пространственные распределения эквивалентных источников, одинаково хорошо аппроксимирующие аномалии силы тяжести на поверхности Земли, могут генерировать заметно различающиеся между собой значения трансформант (Долгаль и др., 2025б; Пугин, 2018). С математической точки зрения это объясняется использованием для решения внешней задачи Дирихле интеграла Пуассона при конечных пределах области интегрирования и дискретном характере задания

значений поля. В большинстве случаев наиболее заметные искажения трансформант возникают на периферии области исследований D_1 и их можно назвать краевыми эффектами.

Точное определение трансформант возможно лишь в случае применения аппроксимационной конструкции, адекватной реальному распределению аномалиеобразующих масс (т.е. плотности) в геологической среде, причем в объеме V_2 , существенно превышающем размер ее изучаемого фрагмента $V_1: V_2 \supset V_1$ (рис. 1). Соответствующие области задания гравитационного поля обозначим как D_1 и D_2 ; $D_2 \supset D_1$. Однако на практике построение такой идеальной аппроксимации невозможно, т.к. истинное пространственное распределение масс (плотности) внутри объемов V_1 , V_2 никогда не известно. В противном случае, «лишаются смысла гравиразведочные (магниторазведочные) работы, цель которых состоит в изучении распределения плотности (намагниченности) в геологической среде» (Результаты..., 1988, с. 67).

Рассмотрим влияние пространственного расположения точечных масс на результаты пересчета гравитационного поля V_R в верхнее полупространство на примере территории Северо-Востока РФ. Для этой цели выполнен ряд вычислительных экспериментов, в которых использовались различные наборы исходных данных о поле и разные схемы расположения эквивалентных источников.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходных данных использовались глобальные модели гравитационного поля Земли (ГПЗ) WHU-CASM-UGM2025 и рельефа

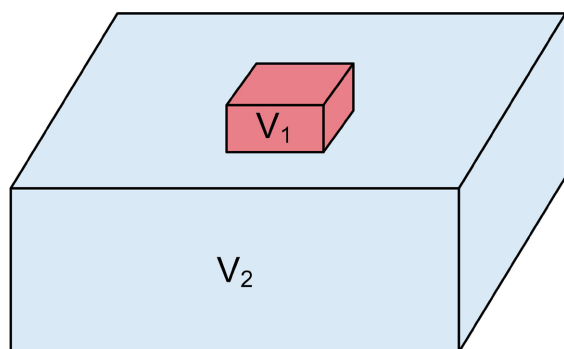


Рис. 1. Схема, поясняющая соотношение между объемом V_2 , отвечающим идеальной аппроксимационной конструкции, и изучаемым фрагментом геоплотностной среды V_1 .

Fig. 1. Diagram explaining the relationship between volume V_2 , corresponding to the ideal approximation structure and the studied fragment of the geodensity medium V_1 .

земной поверхности GTOPO30. WHU-CASM-UGM2025 — это комбинированная ультравысококаспенная (Конешов и др., 2021) глобальная модель гравитационного поля (2190 сферических гармоник), разработанная в 2026 г. Уханьским университетом и Китайской академией геодезии и картографии (Liu et al., 2026). При ее формировании использовались данные спутниковой гравиметрии, альтиметрии, наземные, морские и воздушные измерения, а также топографические данные. GTOPO30 — это цифровая модель рельефа Земли, созданная Геологической службой США (USGS), имеющая разрешение 30 угловых секунд, т.е. ~ 1 км (Gesch et al., 1999).

Анализировались гравитационные аномалии Δg_b в полной редукции Буге, определенные для плотности материков 2.67 г/см³ и плотности океанов 1.05 г/см³. Для области исследований D_1 (территории Северо-Востока РФ размером ~ 2.4 млн км² с координатами 50° – 70° с.ш., 150° – 170° в.д., включающей в себя Чукотский автономный округ, Магаданскую область, Камчатский край и прилегающие акватории), были получены значения поля Δg_b с шагом $15'$. Выбор шага, составляющего в линейной мере ~ 27.8 км по меридиану, 9.6 – 17.9 км по параллели был согласован с разрешающей способностью использованной модели ГПЗ.

Диапазон изменения аномалий силы тяжести ~ 525 мГал, высотные отметки рельефа дневной поверхности H лежат в диапазоне от 0 до 1863 м. Карты изоаномал гравитационного поля и изогипс рельефа дневной поверхности (рис. 2) построены в равнопромежуточной цилиндрической проекции (Лебедев, 2017). Размерность GRID-моделей поля и рельефа составил 81×81 ($N = 6561$ точка). Поле и высоты рельефа в области D_2 с координатами 40° – 80° с.ш., 140° – 180° в.д. заданы с шагом 1° , размер GRID моделей — 41×41 ($N = 1681$ точка).

В процессе вычислительных экспериментов выполнялась истокообразная аппроксимация аномалий силы тяжести, решение СЛАУ вида (1) осуществлялось прямыми методами с использованием QR и сингулярного (SVD) разложений матрицы коэффициентов G (Долгаль, Рыжов, 2026; Каханер и др., 2001). Ниже представлены характеристики исходных данных и методики расчетов.

Эксперимент 1. При его выполнении использовалась совместная аппроксимация двух массивов данных о гравитационном поле и рельефе дневной поверхности, отвечающих непосредственно изучаемой площади D_1 и обрамляющей ее территории области D_2 (рис. 3). На первом этапе расчетов осуществлялось определение значений точечных масс, находящихся на нижнем уровне глубин H_2 в области D_2 , обеспечивающих

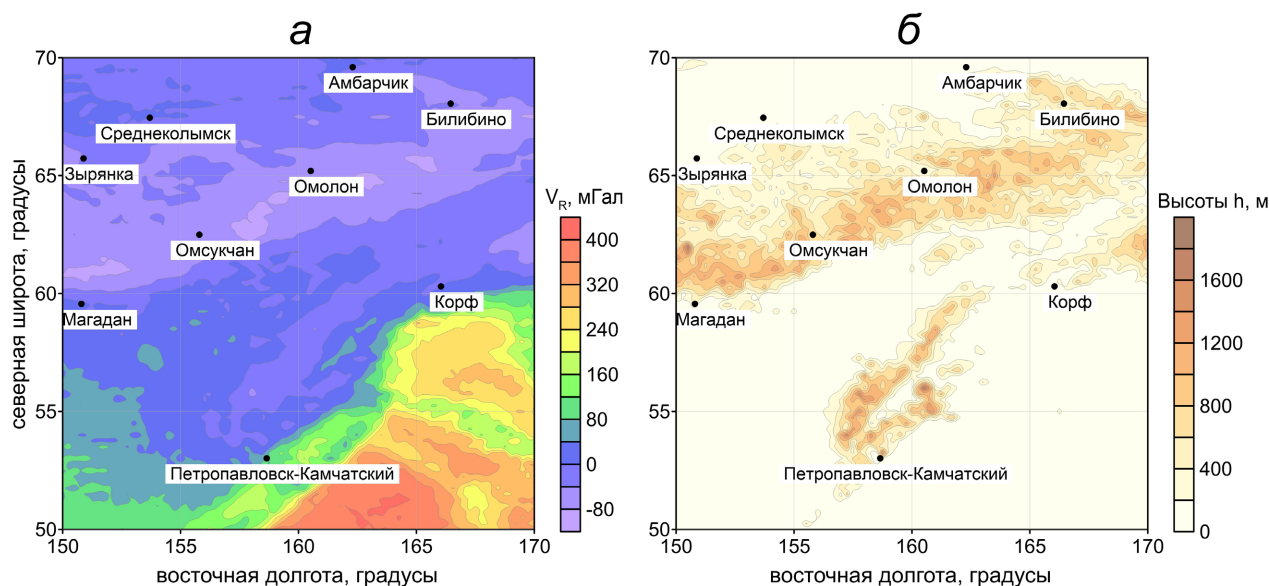


Рис. 2. Карты изоаномал силы тяжести (а) и изогипс рельефа твердой земной поверхности (б) территории исследований.

Fig. 2. Maps of gravity isoanomalies (a) and relief isohypses of the solid earth's surface (б) of the study area.

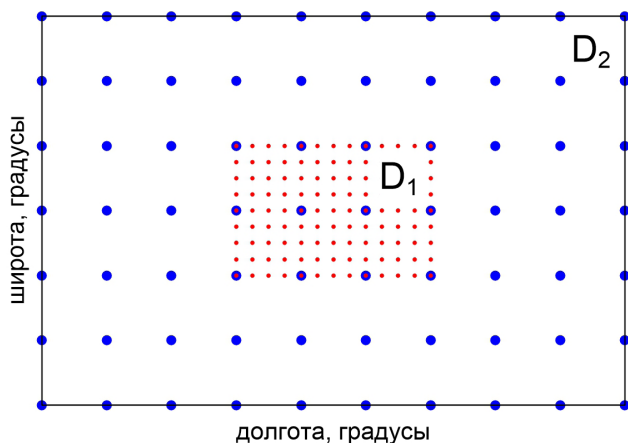


Рис. 3. Схема расположения эквивалентных источников поля в двухуровневой аппроксимационной конструкции: массы в области D_1 на глубине H_1 (красный цвет) и в области D_2 на глубине H_2 (синий цвет).

Fig. 3. Layout of equivalent field sources in a two-level approximation structure: masses in region D_1 at depth H_1 (red) and in region D_2 at depth H_2 (blue).

минимум среднеквадратического расхождения исходного и модельного полей во всех имеющихся точках задания поля. На втором этапе гравитационный эффект от разности исходных значений поля и поля источников нижнего уровня в пределах области D_1 аппроксимировался полем точечных масс, расположенных под каждой точкой на верхнем уровне глубин H_1 (Долгаль и др., 2025б). Далее для этих двух систем точечных масс будем использовать название «нижние» и «верхние» эквивалентные источники (массы), соответственно. Следует отметить, что успешное применение такого типа аппроксимационных конструкций ранее было

охарактеризовано в целом ряде научных работ (Долгаль и др., 2020; Долгаль, Христенко, 2023; Gao et al., 2021; Li et al., 2022).

Исходные данные представляли собой GRID-модели гравитационного поля и высотных отметок с регулярным в градусной мере шагом между точками: Δ_1 (в пределах области D_1) и Δ_2 (в пределах области D_2), $\Delta_2 > \Delta_1$. Введем обозначение $d(\Delta)$ для функции, преобразующей градусную меру координат в линейную для расстояния по меридиану. Выбор глубин $H_1 = d(\Delta_1) = 28$ км, $H_2 = d(\Delta_2) = 111.3$ км обеспечил допустимые значения чисел обусловленности матриц коэффициентов СЛАУ вида (2), возникающих в процессе подбора значений аппроксимирующих точечных масс. Сами массы располагались на конкордантных сфере Каврайского поверхностях с радиусами $R_i = 6372.9 - H_i$, $i = 1, 2$, т.е. в отличие от ранее использованных аппроксимационных конструкций, базирующихся на «классической» схеме В.И. Аронова (1990), в каждой точке изменялись глубины размещения масс относительно земной поверхности. Эти изменения, в силу специфики самой региональной задачи являлись незначительными, т.к. величины H_1 и H_2 всегда существенно превышают возможный перепад высотных отметок рельефа местности. Точность построения модели поля ϵ составила $\|V_R - Gm\|_L^2 \approx 1.2 \times 10^{-13}$ мГал.

Эксперимент 2. Все параметры аналогичны эксперименту 1, кроме глубин размещения точечных масс: $H_1 = 1.5d(\Delta_1) = 42$ км, $H_2 = 1.5d(\Delta_2) = 167$ км и точности аппроксимации $\epsilon \approx 5.2 \times 10^{-12}$ мГал.

Эксперимент 3. Все параметры аналогичны эксперименту 1, кроме данных о поле в пределах

области D_2 : для всех точек используются значения 48.5 мГал, равные среднему для области D_1 . Данная ситуация отвечает отсутствию использования информации для обрамления территории исследований. По физическому смыслу она близка к латеральному расширению аппроксимационной конструкции, впервые предложенному для преобразования аэромагнитных данных (Nakatsuka, 1995), которое в дальнейшем использовалось рядом зарубежных исследователей в гравиметрии (Долгаль и др., 2022). Точность аппроксимации $\varepsilon \approx 1.3 \times 10^{-13}$ мГал.

Эксперимент 4. Все параметры аналогичны эксперименту 1, однако размеры области D_2 уменьшены, ее координаты составляют 45° – 75° с.ш., 145° – 175° в.д., точность аппроксимации $\varepsilon \approx 2.6 \times 10^{-13}$ мГал.

Эксперимент 5. Все параметры аналогичны эксперименту 1, но шаг сети точек в области D_2 равен 5° . Соответственно $H_2 = d(\Delta_2) = 550$ км, точности аппроксимации $\varepsilon \approx 1.5 \times 10^{-13}$ мГал.

Эксперимент 6. «Классическая» схема (1 уровень глубин эквивалентных источников): точечные массы расположены под каждой точкой задания поля на глубине $H_1 = d(\Delta_1) = 28$ км в пределах области исследований D_1 (Аронов, 1990), сведения о поле в области D_2 не используются. Точность аппроксимации $\varepsilon \approx 1.4 \times 10^{-13}$ мГал.

Эксперимент 7. «Классическая» схема (1 уровень глубин эквивалентных источников): точечные массы расположены под каждой точкой задания поля на глубине $H_1 = 2d(\Delta_1) = 56$ км

в пределах области исследований D_1 (Аронов, 1990), сведения о поле в области D_2 не используются. Точность аппроксимации $\varepsilon \approx 9.5 \times 10^{-10}$ мГал.

Эксперимент 8. Используется только поле в области D_1 , но эквивалентные источники располагаются на 2-х уровнях глубин $H_1 = d(\Delta_1) = 28$ км, $H_2 = 4d(\Delta_1) = 112$ км только в объеме V_1 (см рис. 1). Точность аппроксимации $\varepsilon \approx 1.4 \times 10^{-13}$ мГал.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Во всех случаях использованные алгоритмы обеспечили практически точное решение ($\varepsilon < 10^{-9}$ мГал) СЛАУ (1) с числами обусловленности матрицы коэффициентов $\text{cond}(\mathbf{G})$ до 10^8 и более при регуляризации методом TSVD (Долгаль и др., 2025a). Полученные значения масс эквивалентных источников являлись исходными данными для восстановления поля в верхнем полупространстве на высоте 250 км (~9 шагов сети по меридиану для D_1) путем решения прямой задачи гравиразведки. Пересчет гравитационного поля V_R на фрагмент внешней, по отношению к Земле, сферической поверхности с радиусом $R' = R_0 + H$, где $R_0 = 6372.9$ км, $H = 250$ км — нормальная высота, в данном случае соответствует приведению поля V_Z на горизонтальную плоскость $z = \text{const}$ для плоской Земли. Статистические параметры трансформант приведены в таблице. По этим параметрам очевидным образом результаты пересчета можно разделить на две группы: эксперименты 1, 2, 4, 5 и эксперименты 3, 6, 7, 8.

Результаты вычислительных экспериментов

Results of computational experiments

Номер эксперимента	Статистические характеристики гравитационного поля V_R на высоте 250 км, мГал			
	Минимум	Максимум	Среднее	Сред. квадр. отклонение
1	-29.9	250.4	51.3	± 74.4
2	-30.2	252.3	51.8	± 75.0
3	-12.2	155.1	38.4	± 45.7
4	-26.5	232.3	46.2	± 69.9
5	-30.4	264.9	54.2	± 78.7
6	-20.0	142.5	26.7	± 45.5
7	-20.3	149.7	28.2	± 48.3
8	-20.2	158.8	30.8	± 51.3

Морфологические особенности гравитационного поля на высоте 250 км для этих групп также существенно отличаются, при незначительных внутригрупповых различиях (рис. 4, 5). Сразу нужно отметить, что достоверными результатами расчетов автор считает трансформанты, полученные с двухуровневой аппроксимационной конструкцией (рис. 4а, 4б), наиболее отвечающей физическим предпосылкам (рис. 1). Следовательно, результаты для 1-й группы экспериментов можно считать удовлетворительными, а для 2-й группы — не удовлетворительными. На всех картах (рис. 5), в юго-западной части территории отчетливо выделяется эллипсообразная положительная гравитационная аномалия с амплитудой более 120 мГал, представляющая собой артефакт. Вероятно, его появление связано с недостаточ-

ным учетом эквивалентными источниками влияния Тихоокеанской литосферной плиты, уходящей за южную рамку площади исследований и обладающей повышенной плотностью по сравнению с континентальной земной корой. Похожая ситуация с появлением артефактов ранее уже наблюдалась при сопоставлении карт гравитационного потенциала V на высоте 10 км, построенных при разном местоположении эквивалентных источников (Долгаль и др., 2025б).

Поля двухуровневых аппроксимационных конструкций при разных глубинах точечных масс в экспериментах 1 и 2 весьма близки: диапазон изменения разности полей, представленных на рис. 4а, 4б, от -0.8 до 2.6, среднее значение 0.5 мГал, среднеквадратическое отклонение (СКО) ± 0.6 мГал. Изменение глубин в 1.5 раза вызывает сравнительно слабые изменения

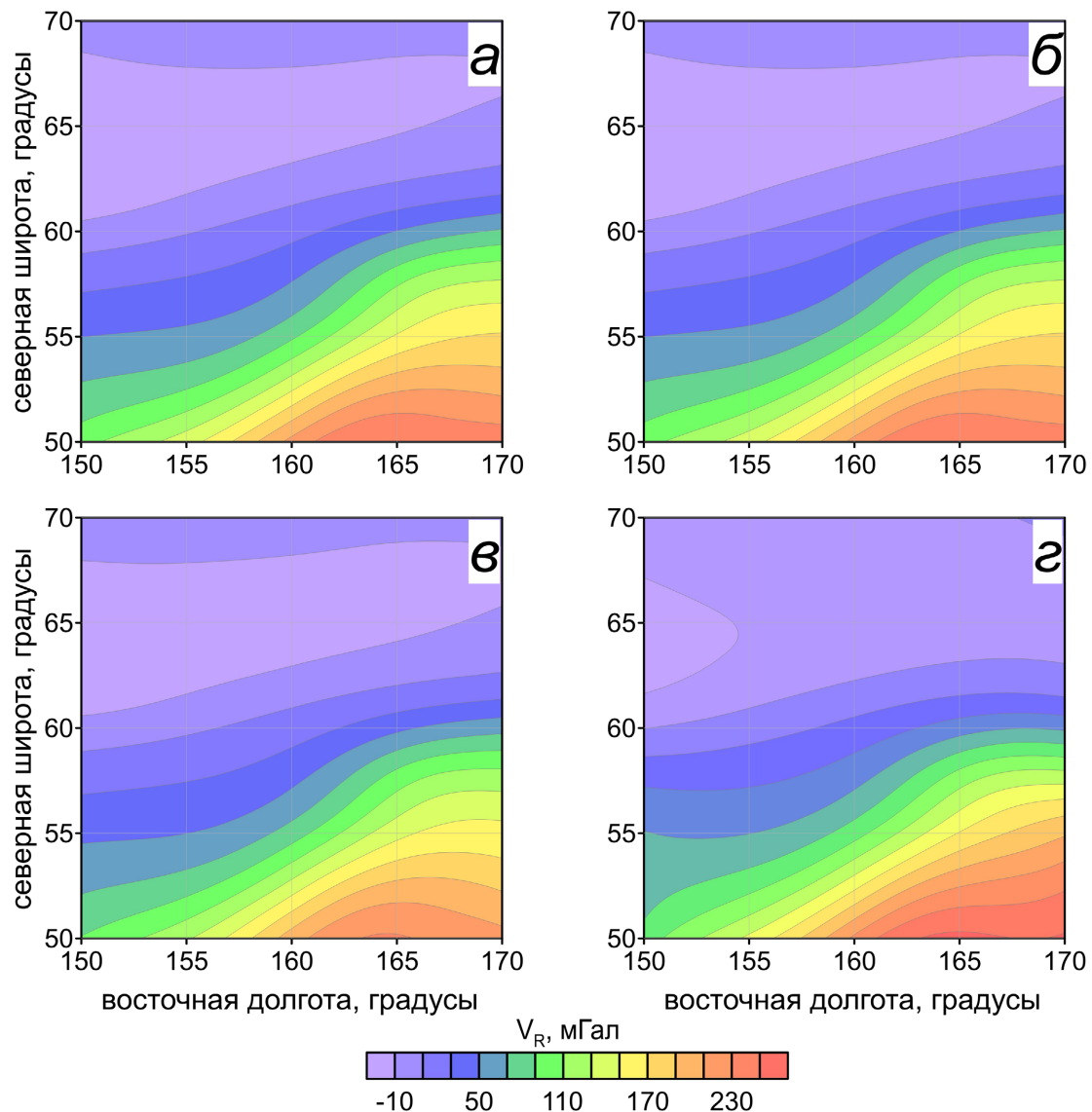


Рис. 4. Карты изоаномал гравитационного поля на высоте 250 км: 1-я группа результатов (эксперименты 1, 2, 4, 5).

Fig. 4. Maps of gravity field isoanomalies at an altitude of 250 km: 1st group of results (experiments 1, 2, 4, 5).

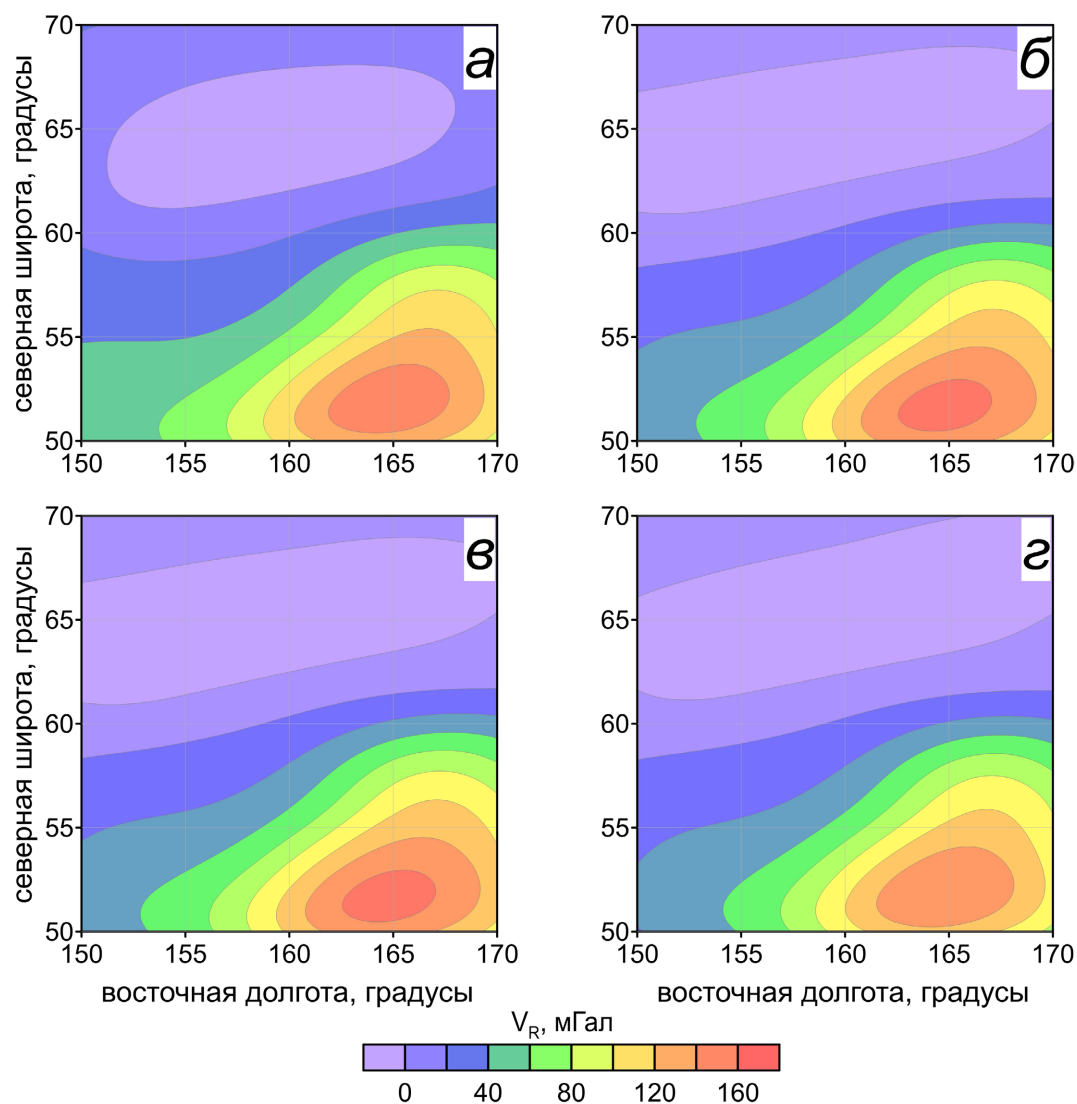


Рис. 5. Карты изоаномал гравитационного поля на высоте 250 км: 2-я группа результатов (эксперименты 3 – а, 6 – б, 7 – в, 8 – г).

Fig. 5. Maps of gravity field isoanomalies at an altitude of 250 km: 2nd group of results (experiments 3 – а, 6 – б, 7 – в, 8 – г).

в результатах пересчета поля, т.е. выбор значений H_1 и H_2 для таких аппроксимационных конструкций (рис. 3) не играет заметной роли. Уменьшение размеров области D_2 (рис. 4в, эксперимент 4) и разрежение сети точек поля в ее пределах (рис. 4г, эксперимент 5) также слабо отражаются на гравитационном поле в верхнем полупространстве на высоте 250 м. О степени генерализации представлений о гравитационном поле, которое моделируется нижними массами, в последнем случае можно судить по рис. 6.

Недостатки одноуровневого расположения эквивалентных источников ранее уже отмечались в работе (Пугин, 2018) и ряде других публикаций. При этом изменение глубины точечных масс в два раза практически не оказывает влияния на морфологию трансформант (рис. 5б и 5в, эксперименты 6 и 7, соответственно).

Это согласуется с ранее полученными результатами при преобразовании магнитного поля синтетического примера (Долгаль и др., 2021). Расширение аппроксимационной конструкции (рис. 5а, эксперимент 3) и два уровня размещения эквивалентных источников под областью исследований D_1 (рис. 5г, эксперимент 8) также не дают желаемого эффекта.

Все выполненные расчеты приводят к выводу о целесообразности привлечения дополнительной информации в виде цифровых моделей поля для области D_2 в методе эквивалентного источника. При выполнении экспериментов использовалась сравнительно большая высота пересчета поля 250 км. Но и при ее уменьшении до 25 км сформулированный выше вывод остается в силе, о чем свидетельствует рис. 7. Разность полей δ (рис. 7а, 7б), имеет размах ~ 76 мГал, матожидание 3.3 мГал и СКО ± 6.2 мГал (рис. 7в).

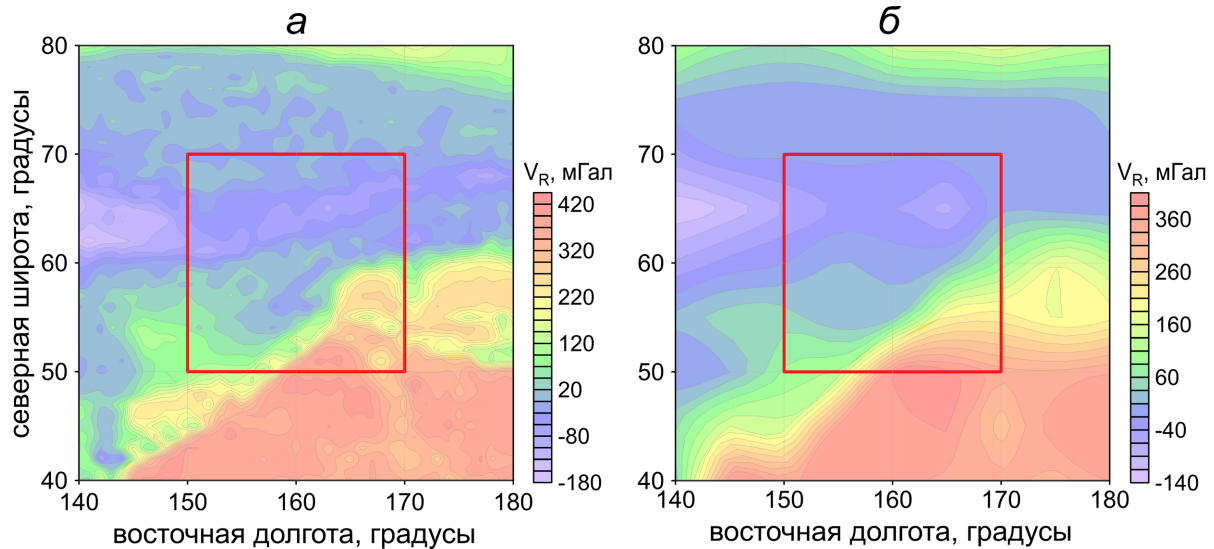


Рис. 6. Карты изоаномал гравитационного поля для области D_2 , построенные при разных шагах сети точек задания поля: a — сеть $1^\circ \times 1^\circ$ (эксперимент 1); b — сеть $5^\circ \times 5^\circ$ (эксперимент 5): красный контур — область исследований D_1 .

Fig. 6. Gravity field isoanomaly maps for region D_2 , constructed at different grid spacings for field assignment points: a — $1^\circ \times 1^\circ$ grid (experiment 1); b — $5^\circ \times 5^\circ$ grid (experiment 5); red outline — study region D_1 .

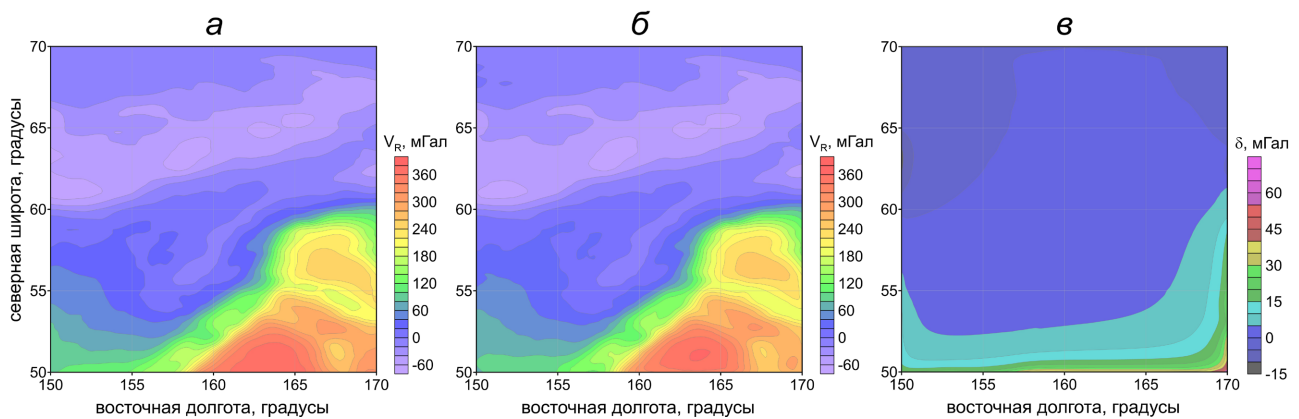


Рис. 7. Карты изоаномал гравитационного поля на высоте 25 км при размещении эквивалентных источников на 2-х уровнях глубин: a — в областях D_1 и D_2 (эксперимент 1); b — только в области D_1 (эксперимент 8); c — разность δ полей a и b .

Fig. 7. Gravity field isoanomaly maps an altitude of 25 km, with equivalent sources placed at two depth levels: a — in regions D_1 and D_2 (experiment 1); b — only in region D_1 (experiment 8); c — the difference δ between fields a and b .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена серия вычислительных экспериментов, результаты которых убедительно свидетельствуют о целесообразности совместного использования двух телескопированных цифровых моделей гравитационного поля для областей D_1 и D_2 с разным шагом сети Δ_1 , Δ_2 при двух уровнях размещения точечных масс — «нижним» и «верхним». Выбор глубин H_1 и H_2 верхних и нижних эквивалентных источников не оказывает существенного влияния на полученные трансформанты. Чтобы ограничить рост чисел обусловленности СЛАУ, возникающих в процессе истокообразной аппроксимации эти значения можно принять равным шагу сетей

задания поля по меридиану $H_1 = d(\Delta_1)$, $H_2 = d(\Delta_2)$. Площадь «обрамляющей» области D_2 должна превышать примерно в 5–10 раз размер территории исследований D_1 .

Допускается использование весьма загрубленных представлений о гравитационных аномалиях в пределах области D_2 . В эксперименте 1 отношение расстояний между точками задания поля $\Delta_2/\Delta_1 = 20$. Это позволяет предложить использование в методе эквивалентного источника существенно более мелких по масштабу дополнительных гравиметрических данных. Для работы с глобальными моделями ГПЗ это не столь важно и может лишь немного ускорить вычислительный процесс. Но материалы наземной гравиметрической съемки или аэрограви-

разведки, выполненных на ограниченных площадях, можно пытаться дополнить необходимой для характеристики области D_2 информацией, извлеченной из ультравысокостепенных моделей ГПЗ. При этом необходимо приведение полей в областях D_1 и D_2 к единому уровню.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР: 126012716041-5).

Список литературы [References]

- Аронов В.И. Методы построения карт геолого-геофизических признаков и геометризация залежей нефти и газа на ЭВМ. М.: Недра, 1990. 301 с. [Aronov V.I. Methods for constructing maps of geological and geophysical features and geometrization of oil and gas deposits on a computer. Moscow: Nedra, 1990. 301 p. (in Russian)].
- Долгаль А.С., Костицын В.И., Новикова П.Н. и др. Моделирование аномалий силы тяжести системой точечных масс на сферообразной Земле // Геофизика. 2023. № 5. С. 10–17. <https://doi.org/10.34926/geo.2023.13.94.002> [Dolgal A.S., Kostitsyn V.I., Novikova et al. Modeling gravity anomalies by a system of point masses on a spherical Earth // Geophysics. 2023. № 5. P. 10–17 (in Russian)].
- Долгаль А.С., Костицын В.И., Новикова П.Н., Ворошилов В.А. Совершенствование методики аналитической аппроксимации данных магниторазведки // Геофизика. 2020. № 5. С. 29–36 [Dolgal A.S., Kostitsyn V.I., Novikova P.N., Voroshilov V.A. Improving the methodology for analytical approximation of magnetic exploration data // Geophysics. 2020. № 5. P. 29–36 (in Russian)].
- Долгаль А.С., Новикова П.Н., Осипова Е.Н. и др. «Томографическое преобразование» аномального магнитного поля с использованием сеточного распределения эквивалентных источников // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2021. № 1. Вып. 49. С. 10–23. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2021-1-49-10-23> [Dolgal A.S., Novikova P.N., Osipova E.N. et al. «Tomographic Transformation» of an Anomalous Magnetic Field Using a Grid Distribution of Equivalent Sources // Vestnik KRAUNTs. Earth Sciences. 2021. № 1(49). P. 10–23 (in Russian)].
- Долгаль А.С., Огородова И.В., Рыжов Н.В., Христенко Л.А. Моделирование аномалий силы тяжести эквивалентными источниками в полярных областях Земли // Вестник Пермского университета. Геология. 2025а. Т. 24. № 3. С. 226–235. <https://doi.org/10.17072/psu.geol.24.3.226> [Dolgal A.S., Ogorodova I.V., Ryzhov N.V., Khristenko L.A. Modeling Gravity Anomalies by Equivalent Sources in the Polar Regions of the Earth // Vestnik of Perm University. Geology. 2025. V. 24, № 3, P. 226–235 (in Russian)].
- Долгаль А.С., Пугин А.В., Новикова П.Н. История метода истокообразных аппроксимаций геопотенциальных полей // Физика Земли. 2022. № 2. С. 3–26. <https://doi.org/10.31857/S0002333722020028> [Dolgal A.S., Pugin A.V., Novikova P.N. History of the Method for Sourcewise Approximations of Geopotential Fields // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2022. V. 58, № 2. P. 149–171]. <https://doi.org/10.1134/S1069351322020021>
- Долгаль А.С., Рашидов В.А., Рыжов Н.В., Хохлова В.В. Алгоритмические и методические аспекты преобразования региональных аномалий силы тяжести (на примере Курильской островной дуги) // Вестник Камчатской региональной ассоциации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. 2025б. № 1(65). С. 5–17. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2025-1-65-5-17> [Dolgal A.S., Rashidov V.A., Ryzhov N.V., Khokhlova V.V. Algorithmic and Methodological Aspects of Transforming Regional Gravity Anomalies (on the Example of the Kuril Island Arc) // Russian Journal of Pacific Geology. 2025. V. 19, № 2. P. 109–119].
- Долгаль А.С., Рыжов Н.В. Применение матричной факторизации в методе эквивалентного источника // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: Материалы 52-й сессии Междунар. научн. семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова. Воронеж: ООО Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2026. С. 100–104 [Dolgal A.S., Ryzhov N.V. Application of Matrix Factorization in the Equivalent Source Method // Issues of Theory and Practice of Geological Interpretation of Geophysical Fields: Proceedings of the 52nd Session of the D.G. Uspensky – V.N. Strakhov International Scientific Seminar. Voronezh: Nauchnaya Kniga Publishing and Printing Center, 2026. P. 100–104 (in Russian)].
- Долгаль А.С., Христенко Л.А. Совершенствование компьютерной технологии разделения аномалий силы тяжести с применением эквивалентных источников // Геофизические исследования. 2023. Т. 24, № 1. С. 31–43. <https://doi.org/10.21455/gr2023.1-2> [Dolgal A.S., Khristenko L.A. Improving Computer Technology for Separating Gravity Anomalies Using Equivalent Sources // Geophysical Research. 2023. Vol. 24, № 1, P. 31–43 (in Russian)].
- Каханер Д., Моулер К., Нэш С. Численные методы и программное обеспечение / Пер. с англ. под ред. Х. Д. Икрамова. М.: Мир, 2001. 575 с. [Kahner D., Moulér K., Nash S. Numerical Methods and Software / Translated from English. edited by Kh. D. Ikramov. Moscow: Mir, 2001. 575 p. (in Russian)].
- Конешов В.Н., Михайлов П.С., Соловьев В.Н., Железняк Л.К. Оценка перспективности и разрешающей способности ультравысокостепенных моделей гравитационного поля Земли // Геофизические исследования. 2021. Т. 22, № 1. С. 40–53. <https://doi.org/10.21455/gr2021.1-3> [Koneshov V.N., Mikhailov P.S., Soloviev V.N., Zheleznyak L.K. Assessing the Prospects and Resolution of Ultra-High-Power Models of the Earth's Gravity Field // Geophysical Research. 2021. Vol. 22, № 1. P. 40–53 (in Russian)].
- Лебедев П.П. Картография: Учебное пособие для вузов. М.: Академический проспект; Трикта. 2017. 153 с. [Lebedev P.P. Cartography: A Textbook for Universities. Moscow: Akademicheskyy Prospekt; Trikshta. 2017. 153 p. (in Russian)].
- Пугин А.В. Истокообразные аппроксимации геопотенциальных полей. От теории к практике // Геофи-

- зические исследования. 2018. Т. 19. № 4. С. 16–30 <https://doi.org/10.21455/gr2018.4-2> [Pugin A.V. Sourceform Approximations of Geopotential Fields. From Theory to Practice // Geophysical Research. 2018. V. 19. №. 4. P. 16–30 (in Russian)].
- Результаты применения моделирования в рудной геофизике в различных районах Сибири / под ред. В.С. Моисеева, Г.Г. Ремпеля. М.: Недра, 1988. 219 с. [Results of Applying Modeling to Ore Geophysics in Various Regions of Siberia / edited by V.S. Moiseev, G.G. Rempel. Moscow: Nedra, 1988. 219 p. (in Russian)].
- Степанова И.Э., Левашов А.Н., Горбачев А.В., Колотов И.И. Адаптивный алгоритм построения метрологических аппроксимаций потенциальных полей Земли // Физика Земли. 2026. №1. С. 214–228. <https://doi.org/10.7868/S3034645226010141>. [Stepanova I.E., Levashov A.N., Gorbachev A.V., Kolotov I.I. Adaptive Algorithm for Constructive Metrological Approximations of the Earth's Potential Fields // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2026. V. 62, № 1. P. 174–186].
- Страхов В.Н., Керимов И.А., Степанова И.Э. Разработка теории и компьютерной технологии построения линейных аналитических аппроксимаций гравитационных и магнитных полей. М.: ОИФЗ РАН, 2009. 254 с. [Strakhov, V.N., Kerimov, I.A., Stepanova, I.E. Development of Theory and Computer Technology for Constructing Linear Analytical Approximations of Gravitational and Magnetic Fields. Moscow: OIPE RAS, 2009. 254 p. (in Russian)].
- Gao B., Hu Z., Li D., Du J. Fusion of Ground and Airborne Magnetic Data Using Multi-Layer Equivalent Source Method // Earth Science. 2021. V. 46, № 5. P. 1881–1895. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.134>
- Gesch D.B., Verdin K.L. and Greenlee S.K. (1999), New land surface digital elevation model covers the Earth, EosTrans. AGU, 80(6), P. 69–70. <https://doi.org/10.1029/99EO00050>
- Li D., Liang Q., Du J., Chen C. A Dual-Layer Equivalent-Source Method for Deriving Gravity Field Vector and Gravity Tensor Components from Observed Gravity Data // Pure and Applied Geophys. 2022. № 179. P. 2273–2288. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03047-3>
- Liu, Cong; Wang, Zhengtao; Jiang, Tao (2026): WHU-CASM-UGM2025 The combined global gravity field model up to degree and order 11000. GFZ Data Service. <https://doi.org/10.5880/icgem/2026/002>
- Nakatsuka T. Minimum Norm Inversion of Magnetic Anomalies with Application to Aeromagnetic Data in the Tanna Area, Central Japan // Journal geomagnetism and geo electricity. 1995. V. 47. № 3. P. 295–311. <https://doi.org/10.5636/jgg.47.295>

SPATIAL ARRANGEMENT OF EQUIVALENT SOURCES IN MODELING GRAVITATIONAL ANOMALIES

A.S. Dolgal

*Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, 614007;
e-mail: dolgal@mi-perm.ru*

Received August 01, 2026; revised August 23, 2026; accepted September 25, 2026

A practical example is presented to examine various spatial arrangements of point masses for source-like approximation of discrete values of the anomalous gravitational field on a fragment of a spherical Earth. The WHU-CASM-UGM2025 global models of the Earth's gravity field and the GTOPO30 global topography models were used as input data. The study area, measuring approximately 2.4 million square kilometers, is bounded by coordinates 50°–70° N, 150°–170° E. One or two depth levels for placing equivalent sources were used in the modeling process. Information on the observed field and the Earth's surface topography was specified either only for the study area or supplemented by data on the surrounding territory. Systems of equations were solved using direct methods, ensuring an approximation accuracy of at least 10^{-9} mGal. The results of eight computational experiments on recalculating gravity anomalies in the Bouguer reduction to the upper half-space are presented. It is established that the lack of field information outside the study area leads to artifacts in the calculation of transforms. Recommendations for improving the reliability of the equivalent source method results are provided.

Keywords: gravity field, anomaly, approximation, equivalent sources, transformation, computational experiment.