
Научные статьи

УДК 550.831.016

<https://doi.org/10.31431/1816-5524-2025-1-65-5-17>

АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ АНОМАЛИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ (НА ПРИМЕРЕ КУРИЛЬСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ)

© 2025 А.С. Долгаль¹, В.А. Рашидов², Н.В. Рыжов¹, В.В. Хохлова¹

¹Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия, 614007; e-mail: dolgal@mi-perm.ru

²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006

Поступила в редакцию 13.11.2024; после доработки 19.11.2024; принята в печать 25.03.2025

Рассматривается методика трансформации аномалий силы тяжести для больших территорий, в которой используются геодезические координаты точек поля и учитывается сферообразная форма Земли. С целью минимизации краевых эффектов используется два уровня глубин размещения эквивалентных источников (точечных масс). Параметры источников определяются путем последовательного решения систем линейных алгебраических уравнений методами Холецкого и наискорейшего градиентного спуска. Высокая скорость вычислений обеспечивается за счет разрежения сети задания значений поля за пределами площади исследований. Осуществляется предварительное геологическое редуцирование аномалий Буге с использованием глобальной модели строения земной коры CRUST1. При решении прямой задачи гравиразведки используется плотная упаковка сферических параллелепипедов. Полученные трансформанты поля используются для дальнейшей интерпретации вероятностно-статистическими методами в системе КОСКАД-3D. Представлены результаты преобразования гравитационного поля в полной редукции Буге для Курильской островной дуги, сопредельных акваторий и частей суши, ограниченных координатами 40°–54° с.ш. и 142°–162° в.д. общей площадью около 2.4 млн км².

Ключевые слова: гравиразведка, аномалия, геологическое редуцирование, трансформация, Курильская островная дуга.

ВВЕДЕНИЕ

Интерпретацию данных гравиразведки в прикладной геофизике традиционно подразделяют на качественную и количественную. В процессе качественной интерпретации осуществляется выделение различных компонент гравитационного поля в редукции Буге Δg_B (трансформация) и анализ их морфологии, направленный на выявление устойчивых взаимосвязей между аномалиями силы тяжести и особенностями геологического строения площади исследований. В процессе количественной интерпретации выполняется определение параметров отдельных возмущающих объектов или моделирование изучаемого разреза (объема)

геологической среды путем решения обратной задачи в 2D или 3D варианте, соответственно.

Целью трансформации является преобразование цифровых моделей поля Δg_B , направленное на «фокусировку» информации об аномалиях, связанных с отдельными геологическими телами, их группами или определенными геологическими границами (Гравиразведка, 1990). Общепринятой классификации методов трансформации гравитационного и магнитного полей не существует. Среди большого числа существующих линейных трансформаций часто выделяют две основные группы, различающиеся по своим спектральным характеристикам: 1 — группу «региональных трансформаций», предназначенных для построения регионального

фона и сглаживания исходного поля и 2 — группу «локальных трансформаций», предназначенных для выделения локальных аномалий различных порядков, обусловленных сравнительно небольшими по размерам, залегающими на малых глубинах (Долгаль, 2023).

Существуют два класса вычислительных методов, использующихся для определения региональных и локальных компонент геопотенциальных полей: 1 — класс, в котором задачи трансформации решаются на основе традиционных методов вычислительной математики (Фурье-преобразования и цифровой фильтрации сигналов) и 2 — класс, где те же задачи решаются на основе аппроксимации (приближения) полей потенциальными (истокообразными) функциями, представляющими собой эффекты эквивалентных источников (Гравиразведка, 1990). В настоящей статье будет рассматриваться метод трансформации, который относится к классу 2.

К нелинейным трансформациям можно отнести также и исключение из интерпретируемого поля Δg_B составляющей, создаваемой геологическими структурами с известными плотностными и геометрическими параметрами, например чехлом осадочных горных пород, перекрывающим кристаллический фундамент. Геологическое редуцирование является реализацией одного из методологических принципов В.Н. Страхова: «при наличии априорной информации о распределении источников аномального поля в некоторой части объема изучаемой геологической среды, эффект от этих источников должен быть исключен из экспериментальных данных о поле» (Страхов, 1979).

В настоящей статье представлена технологическая цепочка преобразования аномалий силы тяжести в полной редукции Буге, включающая в себя: геологическое редуцирование поля Δg_B , вычисление линейных трансформант и анализ полученной информации с использованием вероятностно-статистического подхода. На первых двух этапах использовались программы SP_FORWARD и TRANSF_VR (св. гос. рег. прогр. № 2024683144, № 2024685961), на последнем — комплекс спектрально-корреляционного анализа трехмерных геоданных «КОСКАД 3D» (Петров и др., 2017, 2010). Особое внимание уделено новому алгоритму трансформации региональных аномалий Δg_B разработанному с учетом сферообразной формы Земли, отличительной особенностью которого является учет влияния сторонних (по отношению к изучаемой территории) источников поля. Понятие «учета шарообразности Земли» в данном случае подразумевает отказ от использования декартовой системы координат Σ_{xyz} для позиционирования точек задания поля Δg_B и от представле-

ния урвеной поверхности W_0 , отвечающей нулевой отметке высот в виде горизонтальной плоскости. Соответственно, для используемого приближения формы нашей планеты — сферы Каврайского радиусом $R = 6372.9$ м (Долгаль и др., 2022) понятие аномалии силы тяжести Δg_B будет отвечать уже не 1-й вертикальной производной гравитационного потенциала V_z , а его 1-й радиальной производной V_R .

В настоящей работе представлены результаты применения данной интерпретационной технологии для района Курильской островной дуги (КОД), ограниченного координатами 40° – 54° с.ш., 142° – 162° в.д. с площадью ~ 2.4 млн км² (рис. 1). Выбор данного региона обусловлен его сложным геологическим строением и имеющимися результатами исследований, полученных ранее авторами настоящей статьи при его изучении. Географическое местоположение КОД отвечает максимальному расхождению между геодезической и геоцентрической широтой $\sim 11.5'$, которое наблюдается на параллели 45° , что играет важную роль при сравнении результатов трансформации для разных моделей Земли (Долгаль и др., 2022).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В настоящее время 180 статических моделей геопотенциала Земли представлены на сайте <https://icgem.gfz-potsdam.de/home> Немецкого научно-исследовательского центра наук о Земле в городе Потсдам (ICGEM), который является одним из шести центров Международной гравитационной полевой службы Международной ассоциации геодезии. Все эти модели доступны в виде нормированных коэффициентов сферических гармоник в стандартном формате, который был принят Европейским космическим агентством (ESA — European Space Agency) в качестве официального формата данных международного космического проекта GOCE (Global Ocean Circulation Experiment).

При выполнении исследований использовалась одна из этих моделей — EIGEN-GRGS.RL04.MEAN-FIELD, полученная на основе данных спутниковых миссий GRACE и SLR в 2019 г: гравитационные аномалии в полной редукции Буге, определенные для плотности материков 2.67 г/см³ и плотности океанов 1.05 г/см³ по сети $1^\circ \times 1^\circ$ для области D_2 с координатами 26° – 68° с.ш., 122° – 180° в.д., включающей в себя территорию исследований D_1 , где шаг задания значений поля составил $15^\circ \times 15^\circ$ (рис. 2). Перепад амплитуды гравитационного поля V_R в пределах этой территории достигает ~ 480 мГал. Размерность GRID модели для области D_1 — 57×81 ($N_1 = 4\ 617$ точек), для области D_2 — 43×59 ($N_2 = 2\ 537$ точек).



Рис. 1. Обзорная карта района Курильской островной дуги: красный контур — площадь исследований.
Fig. 1. Overview map of the Kuril island arc area: red contour — research area.

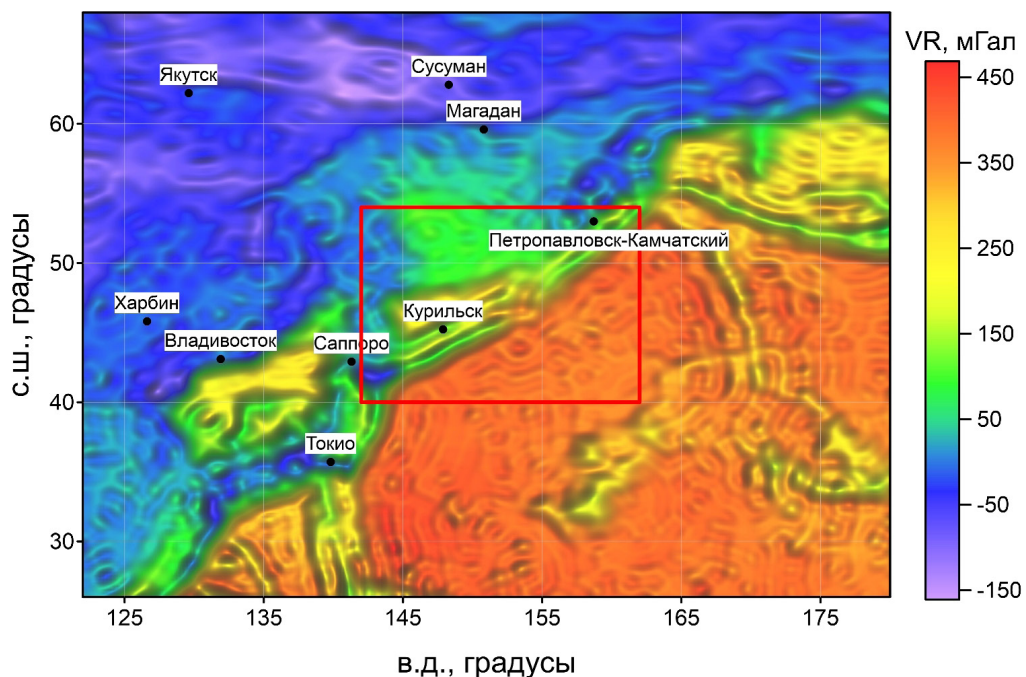


Рис. 2. Карта аномалий силы тяжести V_R в полной редукции Буге — глобальная модель EIGEN-GRGS.RL04.MEAN-FIELD (по материалам ICGEM <https://icgem.gfz-potsdam.de/home>): красный контур — площадь исследований.
Fig. 2. Gravity anomaly map V_R in full Bouguer reduction — global model EIGEN-GRGS.RL04.MEAN-FIELD (based on ICGEM materials <https://icgem.gfz-potsdam.de/home>): red outline — research area.

Источником данных о дневном и подводном рельефе земной поверхности служила модель ETOPO1 (Amante, Eakins, 2009). В процессе геологического редуцирования использовались данные глобальной модели строения земной коры CRUST 1.0 (Laske et al., 2013). Для всех типов исходных данных использовались геодезические координаты — широта B и долгота L для эллипсоида WGS84. Переход от B и L к сферической системе координат $\Sigma\varphi\lambda r$, где r — радиальное расстояние, φ, λ — зенитный и азимутальный углы на сфере Каврайского весьма просто выполняется аналитическим путем (Белкин и др., 1988; Долгаль и др., 2022).

Использование сферы Каврайского имеет некоторые преимущества перед представлением формы Земли в виде эллипсоида вращения, которое влечет за собой использование общеземной геоцентрической системы координат ΣXYZ . Ряд исследователей используют эту систему для решения геофизических задач (Степанова и др., 2017, Мартышко и др., 2018). Для выполнения трансформации, решения прямых и обратных задач гравиразведки в таком случае для каждой точки расчета поля нужен переход от системы ΣXYZ к топоцентрическим (местным) координатам (Торге, 1999), что требует дополнительных вычислительных затрат.

Глобальная модель строения земной коры CRUST 1.0 представляет собой глобальную модель земной коры, заданную по сетке $1^\circ\text{Ч}1^\circ$, которая базируется на компиляции пространственно разобранной геологической и геофизической информации в единую, удобную для использования систему. Точность модели

позволяет отслеживать наиболее крупные тектонические элементы земной коры и ее строение в целом. Данные о мощности осадочного слоя и глубине до границы Мохоровичича (Мохо), представленные в модели CRUST 1.0, были интерполированы методом Triangulation with Linear Interpolation программы Surfer в узлы сети $15' \times 15'$ (рис. 2). Уменьшение шага сети, т.е. апскейлинг (масштабирование) данных во всей области D_2 позволил существенно снизить погрешности решения прямой задачи гравиразведки для осадков и нижележащего слоя земной коры, принятых однородными по плотности. Эффективная плотность осадков при моделировании гравитационных эффектов составила -0.5 г/см^3 , перепад плотности на границе Мохо равнялся 0.25 г/см^3 .

При геологическом редуцировании осуществлялась аппроксимация моделируемых слоев геологического разреза плотной упаковкой сферических параллелепипедов (СП), соприкасающихся между собой боковыми гранями. СП представляет собой фрагмент Ω шара радиусом R с центром, совпадающим с началом координат O сферической системы координат $\Sigma r\varphi\lambda$, помещенным в центр Земли. СП ограничен частями двух сферических поверхностей с радиусами r_1, r_2 и центрами в точке O ; двумя плоскостями, направленными под углами λ_1, λ_2 в экваториальной плоскости и пересекающимися на полярной оси OZ ; двумя коническими поверхностями φ_1, φ_2 с вершиной в точке O . Производная V_R его гравитационного потенциала для точки P с координатами R, φ_0, λ_0 определяется выражением:

$$V_R(R, \varphi_0, \lambda_0) = f\sigma \int_{r_1, \varphi_1, \lambda_1}^{r_2, \varphi_2, \lambda_2} (R - r\cos\omega)r_0^{-3} r^2 \sin\varphi dr d\varphi d\lambda, \quad (1)$$

где f — гравитационная постоянная, σ — плотность тела, $r_0 = (R^2 + r^2 + 2Rr\cos\omega)^{0.5}$, ω — угол при центре шара между точками P и M : $\cos\omega = \cos\varphi_0\cos\varphi + \sin\varphi_0\sin\varphi\cos(\lambda_0 - \lambda)$, r, φ, λ — переменные интегрирования. Интеграл (1) не имеет аналитического решения, поэтому для расчета гравитационного эффекта СП в данном случае приходится прибегнуть к численному интегрированию (Долгаль и др., 2015).

Для решения прямой задачи гравиметрии от 39377 элементарных тел применялся адаптивный квадратурный алгоритм, весьма эффективный при вычислении интегралов от функций с особенностями (Бахвалов и др., 2000). Алгоритм был реализован в программе SP_FORWARD, написанной на языке C++, обеспечивающей высокую скорость расчета. Время вычисления поля V_R в одной точке от единичного СП составляет $\sim 7 \times 10^{-6}$ с.

Процесс геологического редуцирования гравитационного поля характеризуют таблица и рис. 3. Анализ статистических характеристик полей свидетельствует о том, что приближенный учет влияния геологических границ привел к уменьшению размаха и дисперсии V_R при повышении среднего значения. Редуцированное гравитационное поле (рис. 3б) после исключения постоянной составляющей 240 мГал использовалось для дальнейшего вычисления трансформант.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАНТ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

Для трансформации гравитационного поля использовался новый алгоритм, созданный А.С. Долгалем, преобразующий не только информацию, относящуюся к территории

Поле	Минимум/максимум, мГал	Размах, мГал	Среднее, мГал	Сред. квадр. откл., мГал
Исходное поле V_R	-61.8/419.0	480.8	213.1	145.4
Поле V_R после исключения влияния границы Мохо	253.0/526.5	273.5	422.1	66.7
Поле V_R после исключения влияния границы Мохо и слоя осадков	308.0/577.9	269.9	455.4	53.6

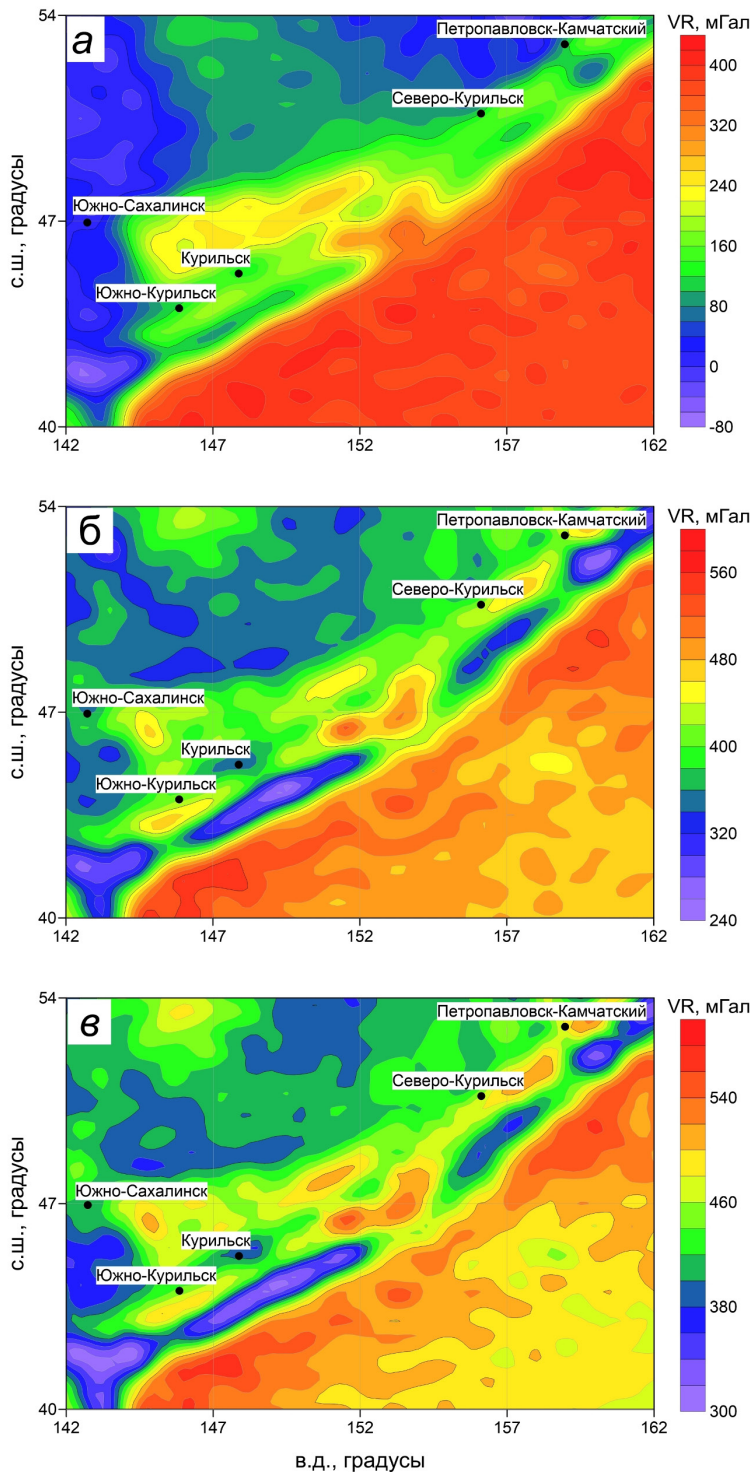


Рис. 3. Результаты геологического редуцирования гравитационного поля V_R : карты изоаномал: *a* — исходного поля; *b* — поля с учетом влияния границы Мохо и слоя осадков.
Fig. 3. Results of geological reduction of the gravitational field V_R : isanomaly maps: *a* — initial field; *b* — field taking into account the influence of the Moho boundary and the sediment layer.

исследований D_1 , но и к сопредельной территории D_2 , площадь которой примерно в 9 раз больше (рис. 2). Усложнение задачи обусловлено многочисленными примерами того, что разные пространственные распределения эквивалентных источников, одинаково хорошо аппроксимирующие аномалии силы тяжести на поверхности Земли, могут генерировать заметно различающиеся между собой значения трансформант (Пугин, 2018). С математической точки зрения это объясняется использованием интеграла Пуассона для решения внешней задачи Дирихле при конечных пределах области интегрирования и дискретном характере задания значений поля. В большинстве случаев наиболее заметные искажения трансформант возникают на периферии области задания поля, их можно считать краевыми эффектами.

Одним из этих способов борьбы с краевыми эффектами является применение двухуровневых аппроксимационных конструкций (Li et al., 2022) в сочетании с разрежением шага сети точек, т.е. раздельное моделирование локальной

и региональной составляющих поля. Расчет трансформант осуществляется путем решения прямой задачи гравиразведки от «глубинных» и «приповерхностных» эквивалентных источников (Долгаль, Христенко, 2023). Качество трансформации и быстроедействие здесь являются достаточно высокими, но информация о реальных геоплотностных неоднородностях за пределами области задания поля не используется.

Алгоритм, реализованный в программе TRANSF_VR (рис. 4), написанной на языке Delphi, является дальнейшим развитием подхода авторов настоящей статьи к построению двухуровневых аппроксимаций гравитационного поля (Долгаль и др., 2024, Долгаль, Рыжов, 2024). В данном случае осуществляется совместная аппроксимация двух массивов данных, отвечающих непосредственно изучаемой площади D_1 и обрамляющей ее территории области D_2 . Под трансформантой функции $u(\varphi, \lambda, R)$ подразумевается новая функция $v(\varphi, \lambda, R)$, определенная на произвольной поверхности S в пределах области D_1 :

$$v(\varphi, \lambda, R) = T\{u(\varphi, \lambda, R)\} = T\{u_1(\varphi, \lambda, R)\} + T\{u_2(\varphi, \lambda, R)\}, \quad (2)$$

где T — некоторый линейный оператор трансформации, а функция u представляет собой сумму двух составляющих: $u = u_1 + u_2$, где u_1 — низкочастотная составляющая, моделируемая набором «глубинных» источников в пределах области D_2 , а u_2 — высокочастотная составляющая, созданная набором «приповерхностных» источников внутри области исследований D_1 .

На первом этапе аппроксимации выполняется определение значений 2537 «глубинных» (111.3 км от земной поверхности) точечных масс, обеспечивающих минимум среднеквадратиче-

ского расхождения исходного и модельного полей во всех имеющихся точках поля, число которых в данном случае составляет 6839 (совпадающие точки областей D_1 и D_2 исключаются). Для этой цели формируется нормальная система линейных алгебраических уравнений, решение которой осуществляется методом Холецкого (Вычислительная ..., 1990). Точность аппроксимации поля для области D_2 составила ~ 2.2 мГал.

На втором этапе гравитационный эффект от разности исходных значений поля и поля «глубинных» источников в пределах области

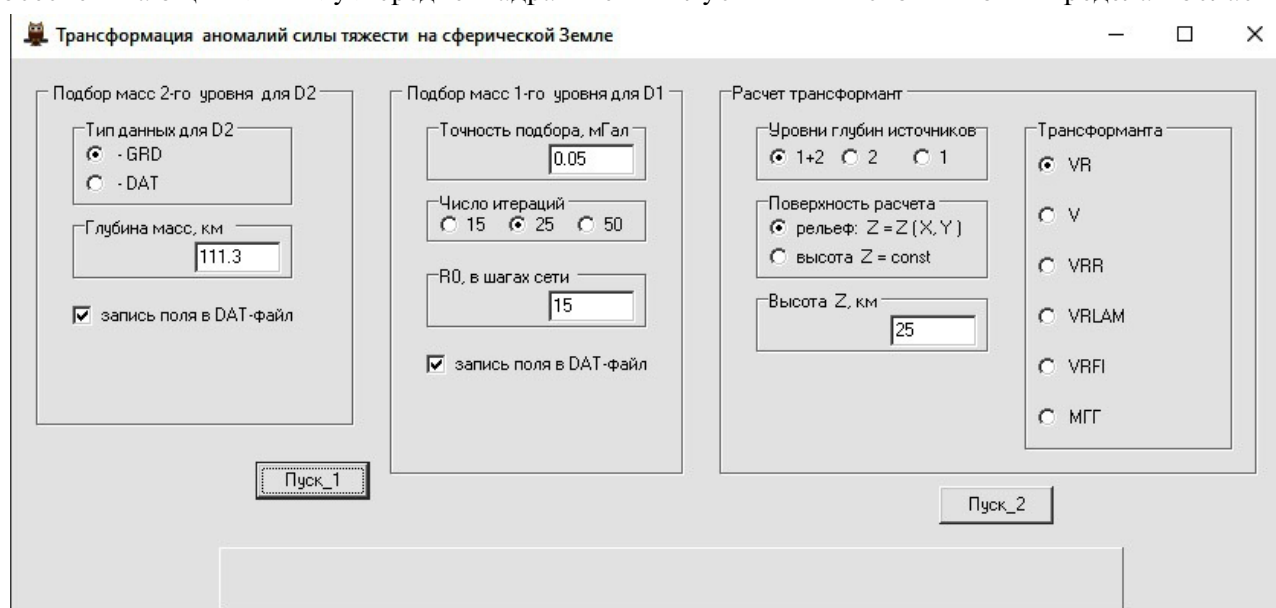


Рис. 4. Главное окно программы TRANSF_VR.

Fig. 4. Main window of the TRANSF_VR program.

D_1 аппроксимируется системой «приповерхностных» точечных масс, расположенных на глубине 27.825 км. Значения этой системы масс определяются путем решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) итерационным методом наискорейшего градиентного спуска. В процессе решения используется предварительно рассчитанный массив коэффициентов системы, хранящийся в оперативной памяти (RAM) компьютера. Он представляет собой разреженную матрицу, сформированную с учетом резкого уменьшения амплитуды гравитационного поля по мере удаления от точечного источника, которая на расстояниях более 584.325 км принималась равной нулю. Данный метод решения СЛАУ ранее успешно использовался при «томографическом» преобразовании магнитного поля (Долгаль и др., 2021). После выполнения 50 итераций была достигнута точность решения СЛАУ 0.16 мГал в евклидовой метрике F_2 (рис. 5), что даже превышает точность исходных материалов (Конешов и др., 2019).

Выбор относительных глубин источников, равных шагу сети задания поля по меридиану для двух цифровых моделей V_R ($1^\circ \cong 111.3$ км, $15' \cong 27.825$ км), обеспечивает достаточно хорошую обусловленность СЛАУ (Долгаль, Новикова, 2023). По оценке авторов статьи данный принцип погружения источников не может использоваться только для площадей, расположенных в полярных областях Земли, за пределами широты 70° .

Время выполнения истокообразной аппроксимации составило 114 с и около 75 % этого вре-

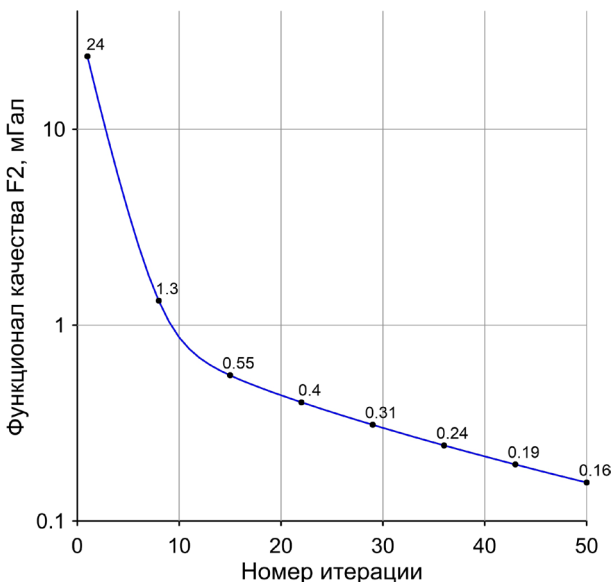


Рис. 5. Характеристика итерационного процесса подбора «приповерхностных» масс методом наискорейшего градиентного спуска.

Fig. 5. Characteristic of the iterative process of selecting «near-surface» masses using the steepest descent method.

мени занял расчет коэффициентов нормальной системы алгебраических уравнений. В дальнейшем этот процесс может быть ускорен за счет использования параллельных вычислений.

После определения значения двух разноглубинных систем точечных масс для вычисления трансформант ν могут применяться различные линейные операторы T (Вычислительная..., 1990). Пересчет гравитационного поля V_R на фрагмент внешней, по отношению к Земле, сферической поверхности с радиусом $R' = R_0 + H$, где H — нормальная высота, в данном случае отвечает приведению поля V_z на горизонтальную плоскость $z = const$ для плоской Земли. На рис. 6а представлены результаты пересчета гравитационного поля V_R на уровень $H = 25$ км. В качестве локальной компоненты поля можно рассматривать V_{RR} на высоте 75 км (рис. 6б) поверхности и его региональной составляющей V_R^{per} .

При работе в сферических координатах $\Sigma\phi\lambda r$ используются достаточно простые аналитические выражения для вторых производных гравитационного потенциала V (Долгаль, Новикова, 2023). Аналогом вертикальной производной силы тяжести V_{ZZ} является 2-я радиальная производная силы тяжести V_{RR} . Соответствующую параллель можно также провести между вторыми производными V_{ZX} , V_{ZY} и $V_{R\lambda}$, $V_{R\phi}$. Вторые производные гравитационного потенциала характеризуют скорость изменения силы тяжести в пространстве и отражают локальные особенности геологического строения. Для корректного использования производных $V_{R\lambda}$, $V_{R\phi}$ при вычислении горизонтального градиента аномалий силы тяжести (рис. 6в) необходимо дополнительно ввести в расчеты коэффициенты Ламе для сферической системы координат $\tau_1 = 1/(R_0 \sin\phi)$ и $\tau_2 = 1/R_0$, соответственно (Булах, Шуман, 1998). Таким образом, для расчета модуля горизонтального градиента (МГГ) Gr применяется формула:

$$Gr = \sqrt{\tau_1 V_{R\lambda}^2 + \tau_2 V_{R\phi}^2}. \quad (3)$$

Карта гравитационного потенциала V на высоте 10 км отражает распределение глубинных геоплотностных неоднородностей (рис. 6г). Подавление влияния разновысотности поверхности наблюдений и эффектов локальных геоплотностных неоднородностей для гравитационного поля в верхнем полупространстве (рис. 6а) позволяет использовать его для дальнейших вычислительных процедур и интерпретационных построений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее уже отмечалось, что результаты трансформации аномалий силы тяжести, полученные

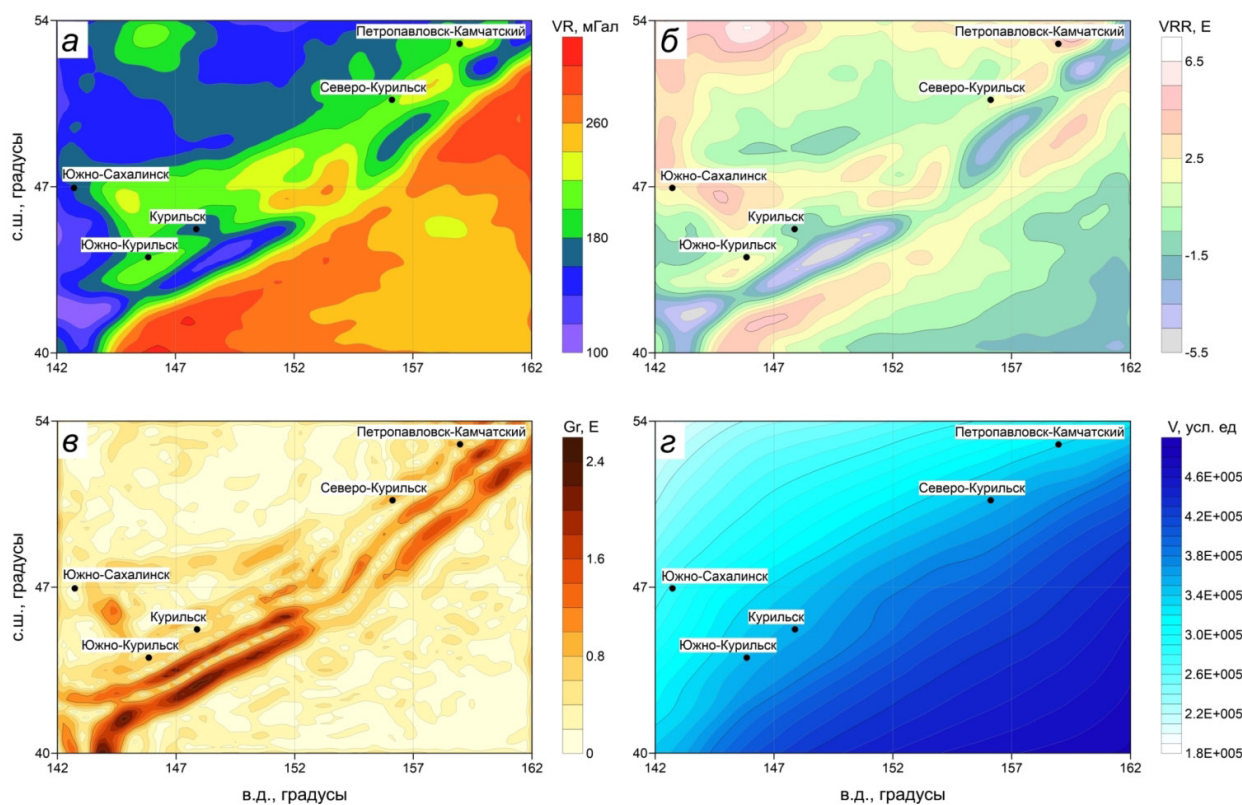


Рис. 6. Карты трансформант гравитационного поля: *a* — V_R на высоте 25 км; *б* — V_{RR} на высоте 75 км; *в* — G_r на высоте 10 км; *з* — V на высоте 10 км.

Fig. 6. Maps of gravitational field transforms: *a* — V_R at an altitude of 25 km; *б* — V_{RR} at an altitude of 75 km; *в* — G_r at an altitude of 10 km; *з* — V at an altitude of 10 km.

путем истокообразной аппроксимации с использованием одной и двух глубин размещения эквивалентных источников, могут быть различными (Долгаль и др., 2024; Долгаль, Христенко, 2023; Пугин, 2018). В ряде случаев эти различия могут иметь принципиальный характер. Сопоставим имеющиеся результаты вычисления гравитационного потенциала V (рис. 6з) на высоте 10 км, с ранее полученными результатами из статьи (Долгаль и др., 2022). В последнем случае использовалась одноуровневая аппроксимационная конструкция с переменными (зависящими от широты) глубинами размещения точечных масс.

Для графического отображения данных (рис. 7) использована равноугольная нормальная коническая проекция (НКП), в которой меридианы изображаются прямыми, сходящимися в общей точке под углами, пропорциональными разности долгот, а параллели изображаются концентрическими окружностями, имеющими общий центр в точке пересечения меридианов (Лебедев, 2017). Параметры НКП: главная параллель 47° , центральный меридиан 152° . Недостаток суммарной массы источников на периферии территории привел к появлению артефактов — замыканию изолиний вблизи ее границ, на северо-западе и юго-востоке (рис. 7а). Это может привести к ложным выводам о наличии

здесь крупных геоплотностных неоднородностей, об отсутствии которых свидетельствуют результаты, полученные новой программой TRANSF_VR (рис. 7б).

С помощью компьютерной технологии КОСКАД-3D (Петров и др., 2017, 2010) было проведено трассирование аномалий гравитационного поля различных энергий и различного направления. Для этой цели использовалась оригинальная модификация одномерной адаптивной фильтрации, результаты применения которой иллюстрирует рис. 8. Максимальные значения параметра P отвечают осям положительных аномалий, а минимумы — осям отрицательных аномалий (рис. 8а), а сами выделенные оси аномалий показаны на рис. 8б. Наиболее отчетливо выделяется линейная зона пониженных значений параметра P , протягивающаяся с юго-запада на северо-восток, отвечающая Курильскому глубоководному желобу (Родников и др., 2014).

Объемное распределение эффективного параметра, пропорционального плотности горных пород, построено в системе КОСКАД-3D (Петров и др., 2017, 2010), с применением статистических, спектрально-корреляционных методов и алгоритма адаптивной фильтрации в расширяющихся окнах живой формы на основе преобразования Б.А. Андреева. Блок-диаграмма

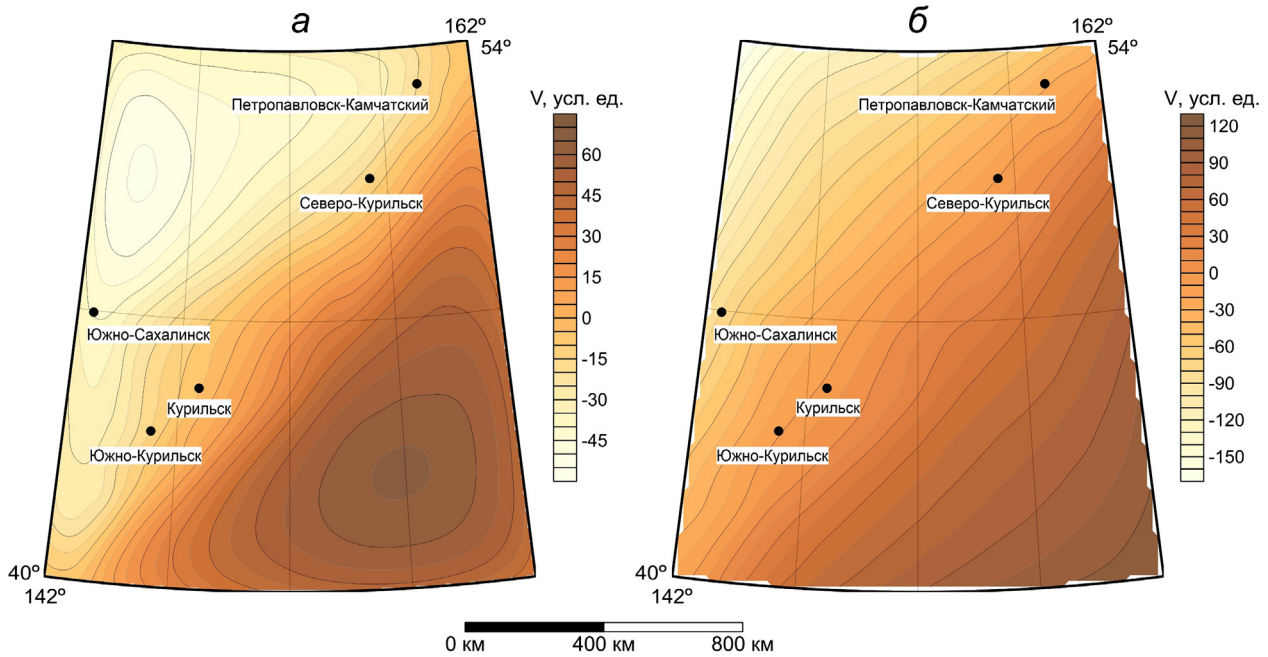


Рис. 7. Карты гравитационного потенциала V на высоте 10 км, построенные в 2022 г (а) и 2024 г (б) при разном местоположении эквивалентных источников поля.

Fig. 7. Gravity potential maps V at an altitude of 10 km, built in 2022 (a) and 2024 (b) with different locations of equivalent field sources.

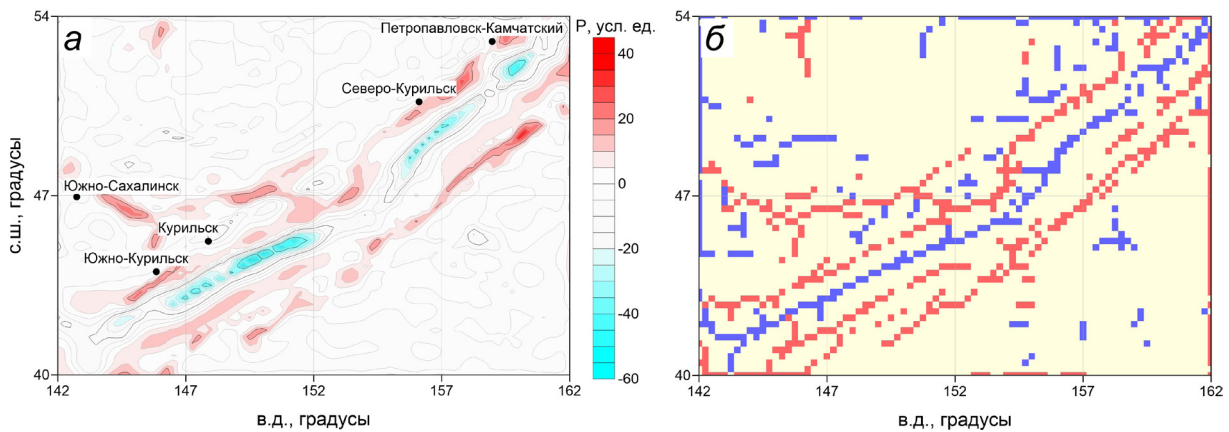


Рис. 8. Результаты автоматического трассирования осей аномалий гравитационного поля V_R в программе КОСКАД-3D: а — карта изолиний параметра P ; б — оси положительных (красный цвет) и отрицательных аномалий (синий цвет).

Fig. 8. Results of automatic tracing of the axes of anomalies of the gravitational field V_R in the KOSKAD-3D program: а — map of isolines of the parameter P ; б — axes of positive (red) and negative anomalies (blue).

квазиплотности (рис. 9) представляет собой результат перехода от 2D к 3D геоизображениям на основе аналитических компьютерных процедур логико-математической генерализации. Это способствует появлению качественно новой информации и закономерностей, т.к. последовательное повышение уровня генерализации обеспечивает проявление на геоизображениях элементов все более крупных геосистем (Бурдэ, 1990).

По мнению А.И. Кобрунова (2008) подобные модели эффективного параметра являются лишь «специального вида изображениями», отражаю-

щими некоторые физико-геологические особенности изучаемого объема среды. Построенная блок-диаграмма (рис. 9) характеризует основные элементы структурно тектонического строения КОД и прилегающих территорий, в т.ч. слабо проявленные в наблюдаемом гравитационном поле. По морфологическим особенностям ее срезов можно выделить ряд дизъюнктивных нарушений, преимущественно субширотного и северо-западного простирания.

Эквивалентное распределение масс источников на глубине сформировано методом И.И. Приезжева (рис. 10). Геоплотностной разрез

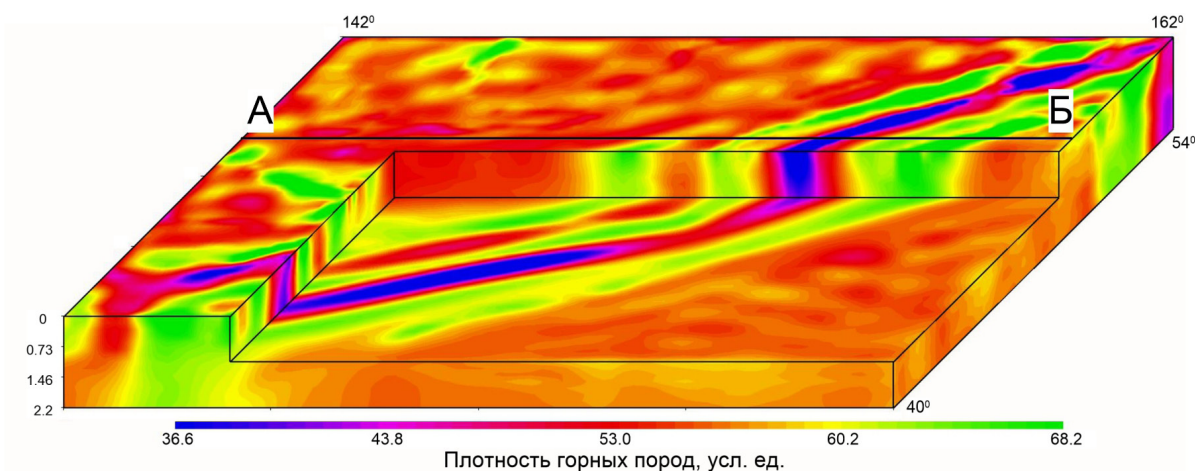


Рис. 9. Блок-диаграмма относительного распределения плотности в земной коре, построенного методом Б.А. Андреева в программе КОСКАД-3D и расчетный профиль АБ.

Fig. 9. Block diagram of the relative density distribution in the Earth's crust, constructed using B. A. Andreyev's method in the KOSKAD-3D program and the calculated profile AB.

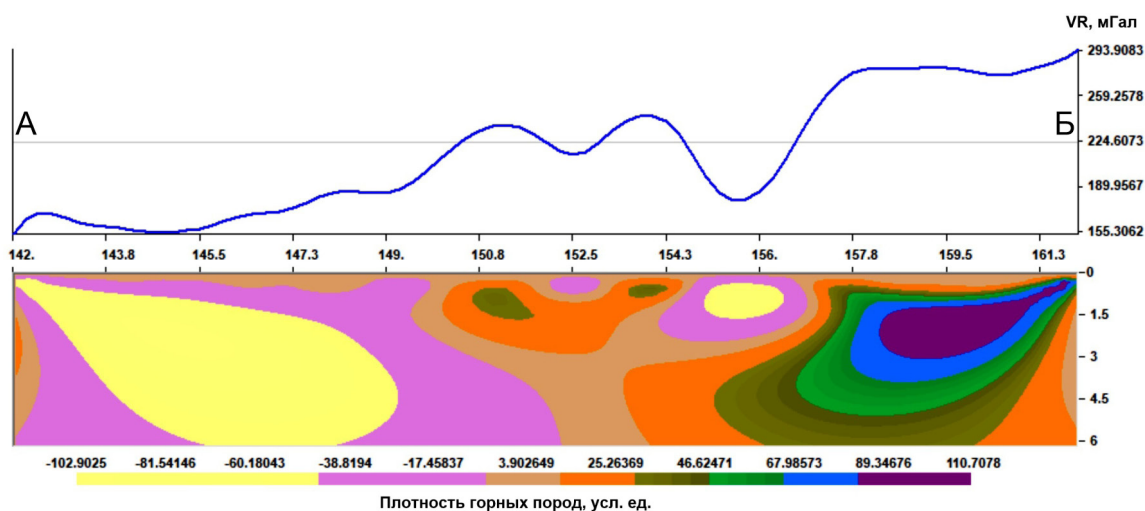


Рис. 10. Геоплотностной разрез по широтному профилю АБ ($\varphi = 48^\circ$), построенный методом И.И. Призьева в программе КОСКАД-3D.

Fig. 10. Geophysical density section along the latitude profile AB ($\varphi = 48^\circ$), constructed using I. I. Priezzhev's method in the KOSKAD-3D program.

отражает достаточно типичную для конвергентных границ геодинамическую обстановку, обусловленную субдукцией океанической коры под Евразийскую плиту (Аплов, 2001).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье представлена компьютерная технология трансформации аномалий силы тяжести в пределах больших территорий, в которой используются геодезические координаты точек задания поля и «квазиэллипсоидальная» модель Земли — сфера Каврайского. Трансформация осуществляется путем построения аналитической модели поля с помощью истокообразной аппроксимации и дальнейшим восстановлением требуемых компонент поля решением прямой задачи гравиразведки для

полученного пространственного распределения эквивалентных источников.

Предлагается использование двух телескопированных цифровых моделей гравитационного поля с разным шагом сети при двух уровнях размещения точечных масс — «глубинном» и «приповерхностном». Это позволяет минимизировать краевые эффекты, проявляющиеся при одной глубине расположения эквивалентных источников и обеспечивает высокую скорость вычислительного процесса. В перспективе для моделированной «глубинным» набором источников могут использоваться аномалии Буге на всей планете (Долгаль, 2024).

Предварительно выполняется геологическое редуцирование наблюдаемого поля с исключением влияния наиболее контрастных геоплотностных границ, включенных в модель

земной коры CRUST1. Эта операция проводится путем решения прямой задачи для набора СП, образующих плотную упаковку в изучаемом объеме геологической среды. Таким образом реализуется препроцессинг — предварительное преобразование геолого-геофизических данных, повышающее достоверность их дальнейшей интерпретации. Результативный набор трансформант, представленные в цифровой форме используется для анализа в системе КОСКАД-3D методами интерпретационной томографии, автоматизированной классификации и распознавания образов.

Разработано программно-алгоритмическое обеспечение для препроцессинга, ориентированное на работу с глобальными моделями гравитационного поля Земли. Проведена его апробация при обработке материалов по территории, расположенной в пределах 40°–54° с.ш., 142°–162° в.д., охватывающей КОД, сопредельные акватории и части суши.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00113, <https://rscf.ru/project/23-27-00113/>.

Список литературы [References]

- Аплонов С.В.* Геодинамика: Учебник. СПб: Издательство Санкт-Петербургского государственного университета, 2001. 360 с. [*Aplonov S.V.* Geodynamics: Textbook. SPb: Izdatel'stvo Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta, 2001. 360 p. (in Russian)].
- Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М.* Численные методы. М.: Наука, 2000. 622 с. [*Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelkov G.M.* Numerical methods. M.: Nauka, 2000. 622 p. (in Russian)].
- Белкин А.М., Миронов Н.Ф., Рублев Ю.И. и др.* Воздушная навигация: справочник. М.: Транспорт, 1988. 303 с. [*Belkin A.M., Mironov N.F., Rublev YU.I. et al.* Air Navigation: Handbook. Moscow: Transport, 1988. 303 p. (in Russian)].
- Булах Е.Г., Шуман В.Н.* Основы векторного анализа и теория поля. Киев: Наукова думка, 1998. 360 с. [*Bulakh E.G., Shuman V.N.* Fundamentals of Vector Analysis and Field Theory. Kiyev: Naukova dumka, 1998. 360 p. (in Russian)].
- Бурдэ А.И.* Картографический метод исследования при региональных геологических работах. Л.: Недра, 1990. 250 с. [*Burde A.I.* Cartographic method of research in regional geological work. Leningrad: Nedra, 1990. 250 p. (in Russian)].
- Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике: справочник геофизика / под ред. В.М. Дмитриева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1990. 498 с. [*Computational Mathematics and Engineering in Exploration Geophysics: A Geophysicist's Handbook / edited by V.M. Dmitriyev.* 2-e izd., pererab. i dop. Moscow: Nedra, 1990. 498 p. (in Russian)].
- Гравиразведка: Справочник геофизика / Под ред. Е.А. Мудрецов, К.Е. Веселова. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Недра, 1990. 607 с. [*Gravity exploration: Geophysicist's Handbook / edited by E.A. Mudretsova, K.E. Veselov.* 2-e izd. pererab. i dop. Moscow: Nedra, 1990. 607 p. (in Russian)].
- Долгаль А.С.* Гравиметрия и магнитометрия: трансформации геопотенциальных масс на сферообразной Земле // Горное эхо. 2024. № 1(94). С. 49–54. <https://doi.org/10.7242/echo.2024.1.8>. [*Dolgal A.S.* Construction of a global analytical model of gravity anomalies using the sourcewise approximation method // Gornoye ekho. 2024. № 1(94). P. 49–54 (in Russian)].
- Долгаль А.С.* Построение глобальной аналитической модели аномалий силы тяжести методом истокообразной аппроксимации // Горное эхо. 2024. № 1(94). С. 49–54. <https://doi.org/10.7242/echo.2024.1.8>. [*Dolgal A.S.* Construction of a global analytical model of gravity anomalies using the sourcewise approximation method // Gornoye ekho. 2024. № 1(94). P. 49–54 (in Russian)].
- Долгаль А.С., Костицын В.И., Новикова П.Н., Пугин А.В.* Моделирование аномалий силы тяжести системой точечных масс на сферообразной Земле // Геофизика. 2023. № 5. С. 10–17 [*Dolgal A.S., Kostitsyn V.I., Novikova P.N., Pugin A.V.* Gravity anomalies modelling by point masses system on a spherical Earth // Geofizika. 2023. № 5. P. 10–17 (in Russian)].
- Долгаль А.С., Костицын В.И., Новикова П.Н. и др.* Подавление помех геологической природы при трансформации региональных аномалий силы тяжести // Геофизика. 2024. № 5. С. 24–29 [*Dolgal A.S., Kostitsyn V.I., Novikova P.N. et al.* Suppression of geological interference during the transformation of regional gravity anomalies // Geofizika. 2024. № 5. P. 24–29 (in Russian)].
- Долгаль А.С., Костицын В.И., Пугин А.В. и др.* Выбор модели Земли для трансформации аномалий силы тяжести в процессе региональных исследований // Геофизика. 2022. № 5. С. 6–12 [*Dolgal A.S., Kostitsyn V.I., Pugin A.V. et al.* Selection of the earth model for the transformation of gravity anomalies in the process of regional studies // Geofizika. 2022. № 5. P. 6–12 (in Russian)].
- Долгаль А.С., Новикова П.Н.* Вычисление вторых производных потенциала силы тяжести на сферообразной Земле // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2023. № 6(43). С. 133–139 [*Dolgal A.S., Novikova P.N.* Calculation of the second derivatives of the gravitational potential on a spherical Earth // Geologiya i poleznye iskopayemyye Zapadnogo Urala. 2023. № 6(43). P. 133–139 (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(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 anomalous magnetic field using grid distribution of equivalent sources // Vestnik KRAUNTs: Nauki o Zemle. 2021. № 1(49). P. 10–23 (in Russian)].

- Долгаль А.С., Новикова П.Н., Пугин А.В. и др.* Трансформация аномалий силы тяжести в пределах больших территорий (на примере Курильской островной дуги) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2022. № 2(54). С. 20–31. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2022-2-54-20-31> [*Dolgal A.S., Novikova P.N., Pugin A.V. et al.* Transformation of gravity anomalies within large territories (by the example of the Kuril island arc) // Vestnik KRAUNTs: Nauki o Zemle. 2022. № 2(54). P. 20–31 (in Russian)].
- Долгаль А.С., Рыжов Н.В.* Расчет трансформант с использованием региональных и глобальной моделей гравитационного поля // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2024. № 7(44). С. 20–27 [*Dolgal A.S., Ryzhov N.V.* Calculation of transforms using regional and global gravity field models // Geologiya i poleznuye iskopayemye Zapadnogo Urala. 2024. № 7(44). P. 20–27 (in Russian)].
- Долгаль А.С., Симанов А.А., Хохлова В.В.* Решение геокартировочных и прогнозно-поисковых геологических задач методом гравиразведки с учетом сферичности Земли // Георесурсы. 2015. Т. 2. № 4(63). С. 56–61 [*Dolgal A.S., Simanov A.A., Khokhlova V.V.* Allowance for the Earth's Sphericity in Quantitative Interpretation of Gravity Anomalies // Georesursy. 2015. T. 2. № 4(63). P. 56–61 (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.* Improvement of computer technology for separating gravity anomalies using equivalent sources // Geofizicheskiye issledovaniya. 2023. T. 24. № 1. P. 31–43 (in Russian)].
- Кобрунов А.И.* Математические основы теории интерпретации геофизических данных. М.: ЦентрЛит-НефтеГаз, 2008. 287 с. [*Kobrunov A.I.* Mathematical foundations of the theory of interpretation of geophysical data. Moscow: TsentrLitNefteGaz, 2008. 287 p. (in Russian)].
- Конешов В.Н., Непоклонов В.Б., Соловьев В.Н. и др.* Сравнение современных глобальных ультровысокоэнергетических моделей гравитационного поля Земли // Геофизические исследования. 2019. Т. 20. № 1. С. 13–26 [*Koneshov V.N., Nepoklonov V.B., Solovyev V.N. et al.* Comparison of modern global ultra-high-power models of the Earth's gravitational field // Geofizicheskiye issledovaniya. 2019. T. 20. № 1. P. 13–26 (in Russian)].
- Лебедев Л.П.* Картография: Учебное пособие для вузов. М.: Академический проект; Трикста, 2017. 153 с. [*Lebedev L.P.* Cartography: A textbook for universities. M.: Akademicheskij projekt; Triksta, 2017. 153 p. (in Russian)].
- Мартышко П.С., Ладовский И.В., Бызов Д.Д., Чернокутлов А.И.* О решении прямой задачи гравиметрии в криволинейных и декартовых координатах: эллипсоид Красовского и «плоская» модель // Физика Земли. 2018. № 4. С. 31–39 [*Martyshko P.S., Ladovskij I.V., Byzov D.D., Chernokutov A.I.* On solving the forward problem of gravimetry in curvilinear and cartesian coordinates: krasovskii's ellipsoid and plane modeling // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2018. V. 54. № 4. P. 565–573. <https://doi.org/10.1134/S1069351318040079>].
- Петров А.В., Демур Г.В., Зиновкин С.В.* Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа данных КОСКАД 3D и практические результаты // Недропользование XXI век. 2017. № 1(64). С. 44–59 [*Petrov A.V., Demura G.V., Zinovkin S.V.* Anisotropic magnetic and density geotomography subsoil in koskad 3d - computer technology statistical and spectral correlation data analysis // Nedropolzovaniye XXI vek. 2017. № 1(64). P. 44–59 (in Russian)].
- Петров А.В., Юдин Д.Б., Хоу Сюели.* Обработка и интерпретация геофизических данных методами вероятностно-статистического подхода с использованием компьютерной технологии «КОСКАД 3D» // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 2 (16). С. 126–132 [*Petrov A.V., Yudin D.B., Khou Syueli.* Processing and interpretation of geophysical information by methods of probabilistic - statistical approach using «KOSKAD 3D» computer technology // Vestnik KRAUNTs: Nauki o Zemle. 2010. № 2 (16). P. 126–132 (in Russian)].
- Пугин А.В.* Истокообразные аппроксимации геопотенциальных полей. От теории к практике // Геофизические исследования. 2018. Т. 19. № 4. С. 16–30. <https://doi.org/10.21455/gr2018.4-2> [*Pugin A.V.* Sourcewise approximation of geopotential fields. From theory to practice // Geofizicheskiye issledovaniya. 2018. T. 19. № 4. P. 16–30 (in Russian)].
- Родников Г.А., Забаринская Л.П., Рашидов В.А., Сергеева Н.А.* Геодинамические модели глубинного строения регионов природных катастроф активных континентальных окраин. М.: Научный мир, 2014. 172 с. [*Rodnikov G.A., Zabarinskaya L.P., Rashidov V.A., Sergeeva N.A.* Geodynamic models of the deep structure of regions of natural disasters of active continental margins. Moscow: Nauchnyy mir, 2014. 172 p. (in Russian)].
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024683144 Российская Федерация. Программа решения прямой задачи гравиразведки от набора сферических параллелепипедов: № 2024682093; заявл. 24.09.2024; опубл. 09.10.2024 / *Долгаль А.С., Рыжов Н.В., Хохлова В.В.*; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук [Certificate of state registration of computer program № 2024683144 Russian Federation. Program for solving the direct problem of gravity exploration from a set of spherical parallelepipeds: № 2024682093; declared. 24.09.2024; published. 09.10.2024 / *Dolgal A.S., Ryzhov N.V., Khokhlova V.V.*; applicant Federal State Budgetary Scientific Institution Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (in Russian)].
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024685961 Российская Федерация. Программа для трансформации региональных аномалий силы тяжести «TRANSF_VR»: № 2024684494; заявл. 18.10.2024; опубл. 02.11.2024 / *Долгаль А.С., Рыжов Н.В., Хохлова В.В.*; заявитель Федеральное государственное бюджетное

- учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук [Certificate of state registration of computer program No. 2024685961 Russian Federation. Program for transformation of regional gravity anomalies «TRANSF_VR»: № 2024684494: declared. 18.10.2024: published. 02.11.2024 / Dolgal A.S., Ryzhov N.V., Khokhlova V.V.; applicant Federal State Budgetary Scientific Institution Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (in Russian)].
- Степанова И.Э., Раевский Д.Н., Щепитилов А.В. Об интерпретации больших объемов данных гравимагниторазведки с помощью модифицированного метода S-аппроксимаций // Физика Земли. 2017. № 1. С. 123–137 [Stepanova I.E., Rayevskiy D.N., Shchepitilov A.V. On the interpretation of large gravimagnetic data by the modified method of s-approximations // Fizika Zemli. 2017. № 1. P. 123–137 (in Russian)].
- Страхов В.Н. Основные идеи и методы извлечения информации из данных гравитационных и магнитных наблюдений. В кн.: Теория и методика интерпретации гравитационных и магнитных наблюдений. М.: Тр. ИФЗ. 1979. С. 146–269 [Strakhov V.N. Basic ideas and methods for extracting information from gravitational and magnetic observation data. In book: Theory and methods of interpretation of gravitational and magnetic observations. Moscow: Tr. IFZ, 1979. p. 146–269 (in Russian)].
- Торге В. Гравиметрия: Пер. с англ. Г.А. Шануров; Ред. Юзефович А.П. М.: Мир, 1999. 429 с. [Torge W. Gravimetry. Berlin, 1989 (in English)].
- Amanate C., Eakins B.W. ETOPOI 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 2009.
- Laske G., Masters G., Ma Z., Pasyanos M. Update on CRUST1.0 — A 1-degree Global Model of Earth's Crust, Geophys. Res. Abstracts, 15, Abstract EGU2013-2658, 2013.
- Li D., Liang Q., Du J. et al. A Dual-Layer Equivalent-Source Method for Deriving Gravity Field Vector and Gravity Tensor Components from Observed Gravity Data. Pure Appl. Geophys. 179, 2273–2288 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03047-3>

ALGORITHMIC AND METHODOLOGICAL ASPECTS OF TRANSFORMATION OF REGIONAL GRAVITY ANOMALIES (ON THE EXAMPLE OF THE KURIL ISLAND ARC)

A.S. Dolgal¹, V.A. Rashidov², N.V. Ryzhov¹, V.V. Khokhlova¹

¹Mining Institute UB RAS, Perm, Russia, 614007;
e-mail: dolgal@mi-perm.ru

²Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006

Received November 13, 2024; revised December 19, 2024; accepted March 25, 2025

The technique of transforming gravity anomalies for large areas, which uses geodetic coordinates of field points and takes into account the spherical shape of the Earth, is considered. In order to minimize edge effects, two levels of depths for placing equivalent sources (point masses) are used. The parameters of the sources are determined by sequentially solving systems of linear algebraic equations using Kholetskiy and steepest descent methods. High computation speed is achieved by sparsely specifying the field values outside the study area. Preliminary geological reduction of Bouguer anomalies is carried out using the global structure model CRUST1. When solving the direct problem of gravity exploration, a dense packing of spherical parallelepipeds is used. The resulting field transforms are used for further interpretation by probabilistic-statistical methods in the KOSKAD-3D system. The results of the transformation of the gravitational field in the full Bouguer reduction for the Kuril island arc, adjacent water areas and land parts bounded by the coordinates 40°–54° N, 142°–162° E with a total area of about 2.4 million km² are presented.

Keywords: gravity survey, anomaly, geological reduction, transformation, Kuril island arc.