

ТРАНСФОРМАЦИЯ АНОМАЛИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ В ПРЕДЕЛАХ БОЛЬШИХ ТЕРРИТОРИЙ (НА ПРИМЕРЕ КУРИЛЬСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ)

© 2022 А.С. Долгаль¹, П.Н. Новикова¹, А.В. Пугин¹, В.А. Рашидов²

¹Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия, 614007

²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006;
e-mail: dolgal@mi-perm.ru

Поступила в редакцию 25.05.2022; после доработки 09.06.2022; принята в печать 27.06.2022

Представлены алгоритм и программа трансформации аномалий силы тяжести для больших территорий, учитывающие сферообразную форму Земли и использующие геодезические координаты точек измерений. При вычислениях применяется «квазиэллипсоидальная» модель В.В. Каврайского, позволяющая осуществлять переход от геодезической к сферической системе координат с повышенной точностью. В основе алгоритма лежит истокообразная аппроксимация значений поля, расположенных в узлах регулярной сети, с глубинами размещения эквивалентных источников, зависящими от широты. Для определения масс источников выполняется решение системы линейных алгебраических уравнений методом наискорейшего градиентного спуска с ускоренным вычислением шага. Представлены результаты трансформации гравитационного поля в редукции Буге для Курильской островной дуги, сопредельных акваторий и частей суши, расположенных в пределах 40°–54° с.ш., 142°–162° в.д. общей площадью около 2.4 млн км². Экспериментально установлено незначительное отличие результатов пересчета аномалий силы тяжести в верхнее полупространство с использованием «сферической» и «квазиэллипсоидальной» моделей Земли.

Ключевые слова: сила тяжести, трансформация, сфера Каврайского, Курильская островная дуга.

ВВЕДЕНИЕ

На величину аномалий силы тяжести в редукции Буге Δg_B в каждой точке наблюдений оказывают влияние геологические объекты, имеющие различную форму и плотность, и залегающие на разных глубинах. 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). При изучении территорий размером $\sim 10^4$ км² и более, которое обычно выполняется путем работы с материалами гравиметрических съемок масштаба 1:200 000 и мельче, при трансформации целесообразно учитывать шарообразную форму Земли (Долгаль и др., 2021a; Страхов, Степанова, 2002).

По оценкам В.Н. Страхова (2001) переход к модели шарообразной Земли необходим при

поперечных размерах площади исследований от 100 км. Понятие «учета шарообразности Земли» в данном случае подразумевает отказ от использования декартовой системы координат для позиционирования точек задания поля Δg_B и от представления урвенной поверхности W_0 , отвечающей нулевой отметке высот в виде горизонтальной плоскости. Соответственно, для самого грубого приближения формы нашей планеты — шара с некоторым радиусом $R = const$ 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 . Вполне очевидно, что все математические расчеты в данном случае следует проводить с использованием сферической системы координат $\Sigma \varphi, \lambda, r$, где r — радиальное расстояние, φ , λ — зенитный и азимутальный углы.

В применяющейся в геодезии модели Земли в виде эллипсоида вращения, наилучшим образом отвечающего фигуре квазигеоида, плановое

положение точек определяется их геодезической широтой B и геодезической долготой L . Глобальные и региональные цифровые модели гравитационного поля обычно представлены в этой системе координат: $\Delta g_B = \Delta g_B(B, L)$. Однако непосредственное использование геодезической системы в процессе преобразования аномалий силы тяжести связано с большими сложностями, поэтому большинство исследователей использует однозначный переход к глобальным геоцентрическим прямоугольным координатам $\Sigma_{ХУЗ}$ (Серрапинас, 2005). В качестве некоторых примеров использования такого подхода в прикладной геофизике можно привести следующие работы (Мартышко и др., 2018; Раевский, Степанова, 2015; Степанова и др., 2017).

В настоящей статье развивается идея применения сферы В.В. Каврайского (Белкин и др., 1988; Долгаль и др., 2015) для трансформации аномалий силы тяжести и предлагается усовершенствованный алгоритм построения региональной аналитической модели поля Δg_B , базирующийся на истокообразной аппроксимации. Представлены результаты применения данного алгоритма для моделирования гравитационного поля в районе Курильской островной дуги (КОД), для территории, расположенной в пределах 40° – 54° с.ш., 142° – 162° в.д. с площадью ~ 2.4 млн км². В качестве исходных данных использовались глобальные модели гравитационного поля в редукции Буге WGM 2012 (Balmino et al., 2012, Bonvalot et al., 2012) и рельефа земной поверхности ETOPO1 (Amante, Eakins, 2009) в системе геодезических параметров Земли WGS84. Модель WGM 2012 включает в себя гравитационные аномалии в полной редукции Буге с плотностью промежуточного слоя 2.67 г/см³, аномалии в свободном воздухе и изостатические аномалии с разрешением в 2 угловые секунды. В данную модель включены поправки за влияние топографических масс, вычисленные по цифровой модели рельефа ETOPO1, а также влияние атмосферных масс.

Отметим, что в целом ряде работ (Глазнев, Якуба, 2020; Конешов и др., 2014, 2019; Муравьев, 2019; Петрищевский, 2021) говорится о возможности использования глобальных моделей гравитационного поля Земли без дополнительной обработки при построении гравиметрических карт масштаба 1:500 000 и мельче, а также для проведения интерпретационных построений.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АЛГОРИТМА ТРАНСФОРМАЦИИ

Алгоритмы трансформации аномалий силы тяжести разделяются на два класса, отличительными особенностями которых являются либо использование общих методов вычислительной

математики, либо учет физических особенностей поля, которое описывается потенциальными функциями (Гравиразведка, 1990). В последнем случае используется аппроксимация наблюдаемого поля Δg_B теоретическим полем Δg_B^* , представленном в виде системы потенциальных функций, отвечающих аномальным эффектам эквивалентных источников. Для данного подхода широко используется название «истокообразная аппроксимация». История возникновения и развития истокообразной аппроксимации подробно изложена в обзорной статье (Долгаль А.С. и др., 2022).

В.И. Ароновым (1990) теоретически доказана возможность представления гравитационного поля Δg_B полем простого слоя Δg_B^* , расположенного всюду ниже поверхности измерений D , с произвольно заданной точностью $\max|\Delta g_B(P) - \Delta g_B^*(P)| \leq \varepsilon$, точка $P \in S$. При численной реализации целесообразна замена простого слоя на эквивалентное сеточное распределение точечных масс, находящихся под точками наблюдений. Простейшим вариантом является размещение этих масс на постоянной глубине R^* относительно поверхности D .

Значения аномальных масс \mathbf{m} определяются путем решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с приближенно заданной правой частью:

$$\mathbf{G}\mathbf{m} = \Delta \mathbf{g}_B, \quad (1)$$

где \mathbf{G} — квадратная матрица значений гравитационных эффектов для точечного источника с единичной массой ($\mathbf{m} = 1$), $\Delta \mathbf{g}_B$ — вектор значений аномалий силы тяжести. Под гравитационным эффектом в данном случае подразумевается радиальная производная гравитационного потенциала точечного источника V_R , определенная в сферической системе координат $\Sigma_{\varphi, \lambda, r}$:

$$V_R(R_0, \varphi_0, \lambda_0) = fm(R - r \cos \omega) / r_0^3 \quad (2)$$

где $f = 6.67 \times 10^{-11}$ м³·кг⁻¹·с⁻² — гравитационная постоянная, m — масса источника, $R_0, \varphi_0, \lambda_0$ — координаты точки измерений, r, φ, λ — координаты источника, $r_0 = \sqrt{R_0^2 + r^2 - 2R_0r \cos \omega}$, ω — центральный угол между точкой измерений и источником относительно точки O — центра земного шара:

$$\cos \omega = \cos \varphi_0 \cos \varphi + \sin \varphi_0 \sin \varphi \cos(\lambda_0 - \lambda).$$

Наиболее сложным и адекватным приближением фигуры Земли является геоид, но при картографических построениях используется более простое приближение эллипсоидом вращения. Геодезические координаты B, L относятся к общеземному эллипсоиду (для России — ПЗ-90.11), в связи с чем возникает вопрос о погрешностях применения «сферической» модели Земли для вычисления гравитационных эффектов от эквивалентных источников в системе $\Sigma_{\varphi, \lambda, r}$ (Атлас Курильских островов, 2009).

Известно, что если решение навигационных задач на поверхности сферы с радиусом $R = 6371.1$ км, отвечающей по объему референц-эллипсоиду Ф.Н. Красовского, при замене геодезической широты B и долготы L сферическими координатами φ, λ приводит к погрешности вычисления расстояний не более 0.5%, а углов — не более 0.4% (Белкин А.М. и др., 1988). Более точный переход от геодезических координат к сферическим предложен В.В. Каврайским (1934):

$$\varphi = B - 8'39'' \sin 2B, \quad (3)$$

при $\lambda = L$ и радиусе Земли $R = 6372.9$ км (Каврайский В.В., 1934). Использование сферы Каврайского позволяет снизить относительные погрешности в расстояниях до 0.08%, в угловых величинах — до 0.1% (Белкин А.М. и др., 1988). Предварительное преобразование координат (Балк П.И. и др., 2016) используется при вычислении матрицы коэффициентов \mathbf{G} , т.е. при переходе от географических координат к сферическим: $(B, L) \rightarrow (\lambda, \varphi)$.

Рассмотренный ниже алгоритм реализует решение задачи истокообразной аппроксимации потенциального поля, заданного на сфере Каврайского («квазиэллипсоидальной» модели Земли). СЛАУ (1) решается итерационным методом Зейделя (МЗ) или наискорейшего градиентного спуска (НГС) с погрешностью $\|\mathbf{Gm} - \Delta \mathbf{g}_B\| \cong \varepsilon$ (Бахвалов Н.С. и др., 2000), где ε — параметр, сопоставимый с точностью гравиметрической съемки. Необходимое качество аппроксимации аномалий силы тяжести и высокую скорость сходимости итерационного процесса обеспечивает соблюдение условия:

$$1 \leq R^*/s \leq 1.5, \quad (4)$$

где R^* — удаление точечной массы от поверхности наблюдений по нормали в направлении к центру Земли, s — расстояние между точками измерений (Долгаль А.С. и др., 2021а). Условие (4) позволяет найти компромисс между двумя противоречивыми требованиями к собственной погрешности метода истокообразной аппроксимации $\|\delta_2\|_C \leq \|\delta_1\|_C[1 + O(1/R^*)]$, в свою очередь зависящей от неустраняемой погрешности $\|\delta_1\|_C$, связанной с шагом дискретизации поля Δg_B (Аронов В.И., 1990) и к обусловленности СЛАУ (Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике, 1990), которая резко ухудшается с ростом глубины размещения источников R^* (Долгаль А.С. и др., 2021б).

Длина дуги параллели зависит от широты B . В рассматриваемом ниже примере для территории, охватывающей КОД, на южной границе она составляет 85.395 км, на северной — 65.577 км (для 1° на эллипсоиде Красовского). По мере перемещения с юга на север, при постоянном шаге по широте $\Delta\varphi$ между точками задания гравитационного поля в градусной мере,

фактическое расстояние s между ними будет сокращаться примерно на 25%.

Поэтому с целью выполнения условия $R^*/s = \text{const}$ для больших территорий целесообразно отказаться от фиксированной глубины эквивалентных источников и перейти к $R^* = R^*(\varphi)$. Для модели Каврайского эта глубина в км определяется следующим образом:

$$R^* = 6372.9 \times \Delta\varphi \times \sin\varphi \times k, \quad (5)$$

где $\Delta\varphi$ — шаг между точками задания поля по координате φ , k — относительная глубина эквивалентного источника (в шагах сети).

Вектор определенных в результате решения СЛАУ значений масс \mathbf{m} , привязанных к системе сферических координат $\Sigma \varphi, \lambda, r$, в совокупности с функцией расстояния задает собой аналитическую модель исходного поля Δg_B . Для вычисления его трансформант \mathbf{u} в произвольно выбранных точках пространства используется соответствующий оператор решения прямой задачи \mathbf{A} :

$$\mathbf{u} = \mathbf{A}\mathbf{m}. \quad (6)$$

Например, для пересчета гравитационного поля в верхнее полупространство достаточно задать необходимое значение $R_0 > 6372.9$ км при вычислении V_R в формуле (2) и осуществить умножение матрицы \mathbf{A} на имеющийся вектор \mathbf{m} .

Описанный выше алгоритм реализован в виде программы APPROX_SF_1, написанной с использованием объектно-ориентированного языка программирования Delphi. При итерационном решении СЛАУ (1) задаются количество итераций и требуемая погрешность аппроксимации поля ε в евклидовой метрике $F2$. Дополнительный контроль качества решения СЛАУ осуществляется в метрике Чебышева FM . Относительная глубина размещения эквивалентных источников R^* задается пользователем. Трансформанты аномалий силы тяжести вычисляются на поверхности наблюдений D или на поверхности сферы Каврайского заданного радиуса $R > 6372.9$ км. В узлах регулярной сети $\Delta\varphi = \text{const}$, $\Delta\lambda = \text{const}$ могут быть рассчитаны гравитационный потенциал V , его 1-я V_R или 2-я V_{RR} радиальные производные.

ТРАНСФОРМАЦИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ РАЙОНА КОД

Рассмотрим результаты применения программы APPROX_SF_1 для трансформации гравитационного поля КОД в редукции Буге. Размер территории составляет 14° по широте, 20° по долготе, в ее пределах находятся города Петропавловск-Камчатский, Северо-Курильск, Курильск, Южно-Сахалинск и поселок городского типа Южно-Курильск. Цифровые данные представляют собой GRID-файлы (матрицы) размером 211 строк, 301 столбец. Сеть задания

значений поля Δg_B и высот/глубин земной поверхности разрежена в 2 раза и составляет $4' \times 4'$, т.е. расстояния s между точками по меридиану примерно 7.420 км, по параллели — 5.680 км на южной границе и 4.358 м — на северной. Точки задания поля находятся на поверхности Земли (нижней границе атмосферы) (Balmino G. et al., 2012). Амплитуда аномалий силы тяжести Δg_B изменяется от -490 мГал до 518 мГал, максимальная высотная отметка рельефа достигает 2230 м, минимальная отметка глубин составляет -9340 м. Можно отметить ярко выраженную пространственную корреляцию аномалий Буге и рельефа земной поверхности (Атлас Курильских островов, 2009): по результатам расчета авторов статьи коэффициент детерминации между значениями Δg_B и отметками высот/глубин равен 0.79, линейная зависимость между этими параметрами имеет вид $\Delta g_B = -0.057H - 174.1$.

Для графического отображения данных 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 Л.П., 2017). Параметры НКП: главная параллель 47° , центральный меридиан 152° (рис. 1).

Использовались несколько вариантов построения аналитической модели поля с глубинами расположения точечных масс $R^*/s = 1, 1.5, 2$; для каждой аппроксимации реше-

ние СЛАУ (1) осуществлялось двумя методами — МЗ и НГС. Максимальное число итераций составило 25. Критерием завершения процесса подбора масс эквивалентных источников являлось выполнение неравенства $F2 \leq 0.05$ мГал. На рис. 2 приведены графики сходимости итерационного процесса аппроксимации в метрике $F2$ в полупологическом масштабе. Дополнительная информация о разных вариантах решения СЛАУ содержится в таблице 1.

Следует обратить внимание на медленную сходимость итерационных процессов решения СЛАУ. Большая часть площади исследований принадлежит акватории Охотского моря и Тихого океана, однако рельеф поверхности суши здесь является весьма сложным, с крутыми склонами и перепадом отметок высот более 2.2 км. Это предположительно приводит к увеличению чисел обусловленности для соответствующих СЛАУ, т.е. применительно к методу истокообразной аппроксимации в данном случае можно говорить о «сильном» по влиянию рельефе поверхности задания поля D (Долгаль А.С., 2020а). В частности, это привело к явно неудовлетворительным результатам метода НГС при относительных глубинах элементарных масс, равных 1.5 и 2.

Специфической особенностью итерационного алгоритма является необходимость многократного вычисления элементов матрицы коэффициентов G для каждого цикла умножения ее на вектор приближенных значений неизвестных m . Размер матрицы делает невозможным ее хранение в оперативной памяти (RAM)

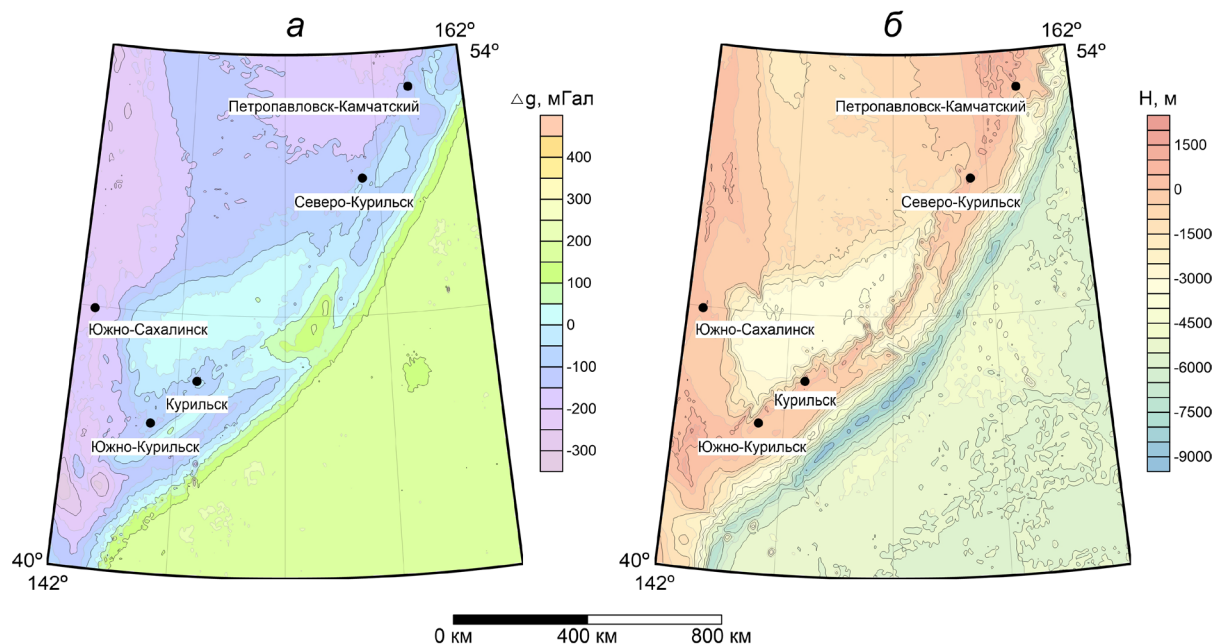


Рис. 1. Исходные данные: *а* — карта изоаномал силы тяжести в редукции Буге; *б* — карта изогипс рельефа земной поверхности.

Fig. 1. Initial data: *a* — map of the isoanomal of gravity in the Bouguer reduction; *b* — map of isohypses of the earth's surface relief.

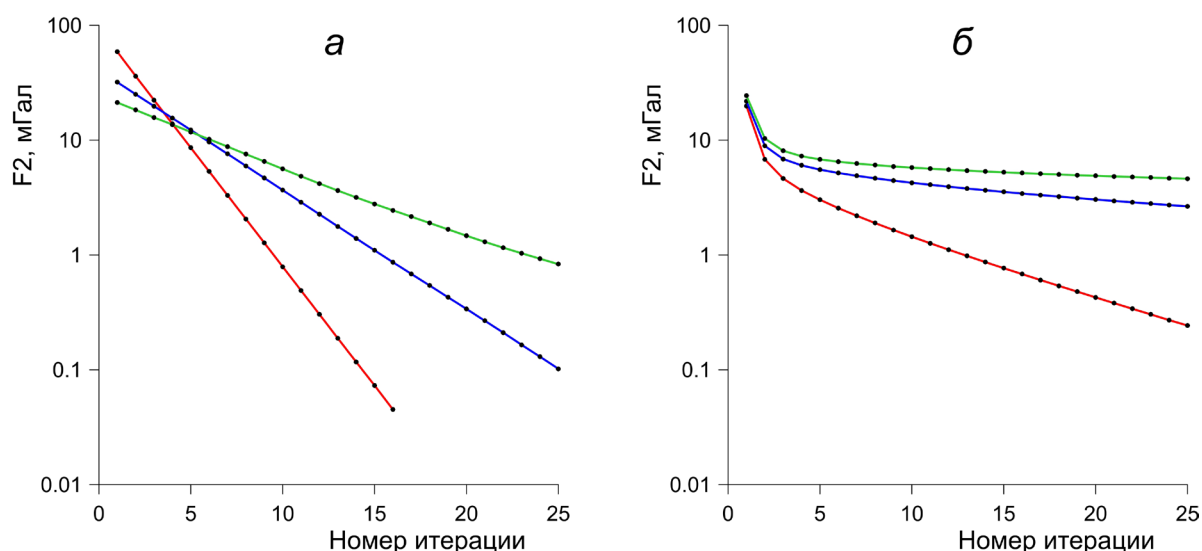


Рис. 2. Графики сходимости итерационных процессов при разных глубинах эквивалентных источников для метода Зейделя (*а*); для метода наискорейшего градиентного спуска (*б*): относительные глубины источников — 1 (красный цвет); 1.5 (синий цвет); 2 (зеленый цвет).

Fig. 2. Plots of convergence of iterative processes at different depths of equivalent sources for the Seidel method (*a*); for the quickest gradient descent method (*b*): relative source depths — 1 (red color); 1.5 (blue color); 2 (green color).

Таблица 1. Характеристика различных вариантов решения СЛАУ

Table 1. Characteristics of various options for solving system of linear algebraic equations

Метод	Относительная глубина источников, R^*/s	Число итераций	Показатели качества решения, мГал		Время расчета, час:мин:сек
			F2	FM	
Зейделя	1.0	16	0.05	0.50	3:30:53
	1.5	25	0.102	1.83	3:37:45
	2.0	25	0.83	18.31	3:38:28
НГС	1.0	25	0.24	8.35	3:40:17
	1.5	25	2.65	113.26	3:39:19
	2.0	25	4.61	223.56	3:43:20

компьютера: в данном случае он составляет $\sim 4 \times 10^9$ элементов (вещественных чисел). Выбранные методы приближенного решения СЛАУ требуют минимального количества операций умножения матрицы на вектор внутри каждой итерации.

В МЗ получение истинных значений функционалов $F2$ и FM возможно лишь при двукратном выполнении такой операции, однако можно ограничиться ее однократным применением. Установлено, что оценки точности, получаемые на $k + 1$ итерации в процессе расчета, при совместном использовании «старых» m_{ij}^k и «новых» m_{ij}^{k+1} значений неизвестных масс m , не имеют существенных различий. Это подтверждается сопоставлением текущих оценок $F2$ и FM и реальной точности решения СЛАУ, полученной после выполнения расчета и восстановления поля Δg_B эквивалентных источников во всех точках путем решения прямой задачи гравиразведки (Долгаль А.С. и др., 2021а).

Снизить вычислительные затраты в методе НГС удастся при учете специфики структуры матрицы коэффициентов G , отражающей эффекты затухания поля точечной массы при значительном удалении ρ от нее по горизонтали. Можно выбрать пороговое значение R_0 предполагая, что при $\rho > R_0$ выполняется условие $G(\rho) = 0$. Если вектор Δg_B содержит $m \times n$ компонент, а внутри окружности радиусом R_0 находится k точек поля, то разреженная матрица коэффициентов \tilde{G} включает в себя лишь $m \times n \times k$ элементов. Такую разреженную матрицу коэффициентов \tilde{G} во многих случаях удастся поместить в оперативную память (RAM) компьютера, в данном случае было принято $R_0 = 15$. Число операций в одном из двух циклов внутри итерации при выборе шага спуска τ в методе НГС будет меньше в $(m \times n)/k \approx 2234$ раза:

$$\tau = (\tilde{G}\alpha - \Delta g_B, \tilde{G}\alpha - \Delta g_B) / (\tilde{G}(\tilde{G}\alpha - \Delta g_B), \tilde{G}\alpha - \Delta g_B).$$

В сложных физико-геологических условиях Курильской островодужной системы отчетливо проявляется ярко выраженное ухудшение каче-

ства решения СЛАУ при погружении аппроксимационной конструкции с увеличением величины R^*/s . Подобная закономерность, связанная с резким увеличением чисел обусловленности матрицы \mathbf{G} , ранее уже отмечалась авторами (Долгалъ А.С. и др., 2021б) и ее теоретические аспекты рассматривались еще в XX в. В.И. Ароновым (1990).

После построения аналитической модели аномалий силы тяжести для вычисления трансформант \mathbf{u} могут применяться различные линейные операторы \mathbf{A} (Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике, 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 $z = \text{const}$ для плоской Земли. На рис. 3а представлена региональная составляющая поля $V_R^{\text{рег}}$, полученная путем его пересчета на уровень $H = 100$ км. В роли локальной компоненты поля $V_R^{\text{лок}}$ (рис. 3б) выступает разность поля Δg_B на уровне $H = 2.3$ км, близким к максимальной высотной отметке рельефа земной поверхности и его региональной составляющей $V_R^{\text{рег}}$. Подавление эффекта разновысотности обеспечивает более регулярный характер локальной составляющей поля $V_R^{\text{лок}}$, чем традиционный прием вычисления разности наблюдаемого поля и регионального фона.

Кроме вычисления V_R в произвольно выбранных точках внешнего (по отношению к эквивалентным источникам) пространства, допу-

скается расчет других компонент поля. Карта гравитационного потенциала V на высоте 10 км отражает распределение глубинных геоплотностных неоднородностей (рис. 4а). В результате полосовой фильтрации — вычисления 2-й радиальной производной поля V_{RR} на высоте 30 км получена карта локальных аномалий (рис. 4б).

Результаты трансформации позволяют отчетливо выявить основные элементы структурно-тектонического строения КОД и прилегающих территорий, в т.ч. слабо проявленные в наблюдаемом гравитационном поле Δg_B . Интенсивное нарастание амплитуды гравитационного поля по мере движения с северо-запада на юго-восток обусловлено, преимущественно, изменениями глубины границы Мохо от ~ 40 км до ~ 12 км в этом направлении (Сеначин В.Н. и др., 2013). Определенно по высоким значениям горизонтального градиента полей $V_R^{\text{рег}}$ и V трассируется зона контакта Охотоморской и Тихоокеанской плит северо-западного простирания (рис. 3а, рис. 4а). Дугообразной цепочкой локальных отрицательных аномалий силы тяжести отображается Большая Курильская гряда, к которой с востока примыкает линейная зона повышенных амплитуд поля, отвечающая Курильскому глубоководному желобу. Западнее Большой Курильской гряды в поле $V_R^{\text{лок}}$ фиксируется положительная аномалия с амплитудой более 40 мГал над Курильской глубоководной котловиной. В локальных составляющих поля проявляются особенности распределения геоплотностных неоднородностей в пределах Южных, Центральных и Северных Курил, описанные в «Атласе Курильских остро-

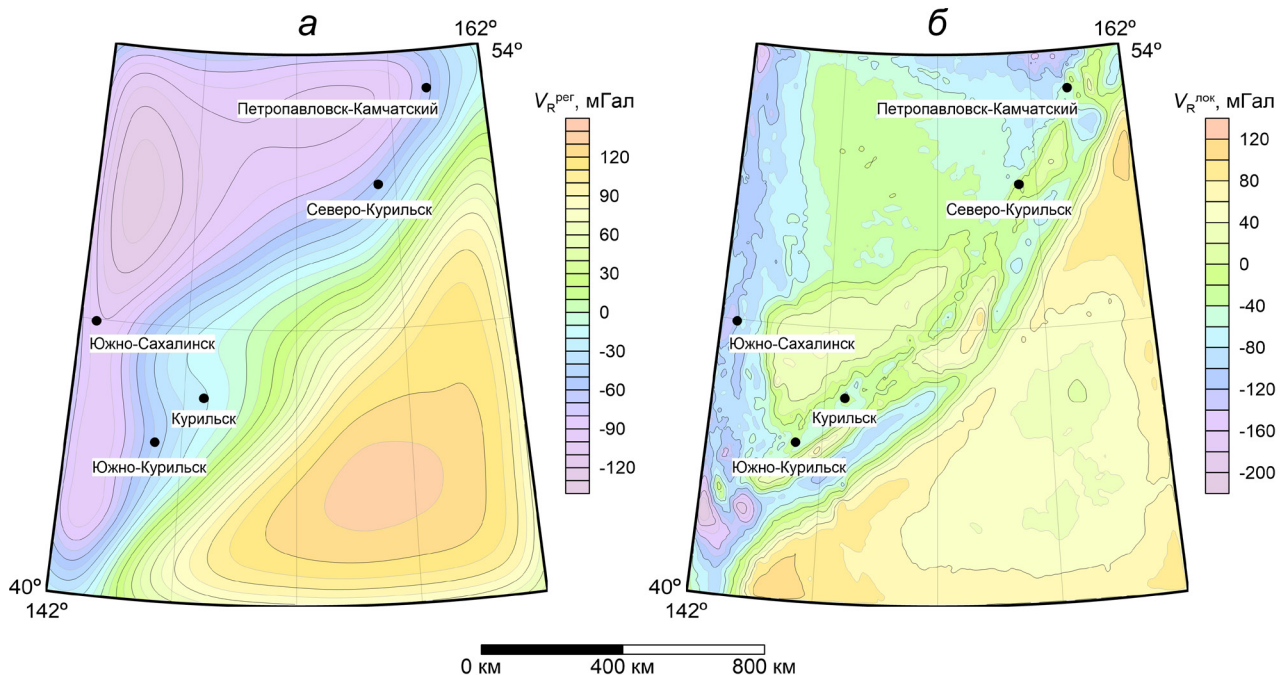


Рис. 3. Карты изоаномал региональной $V_R^{\text{рег}}$ (а) и локальной $V_R^{\text{лок}}$ (б) составляющих гравитационного поля.
Fig. 3. Maps of the regional V_R^{reg} (а) and local $V_R^{\text{лок}}$ (б) components of gravity field.

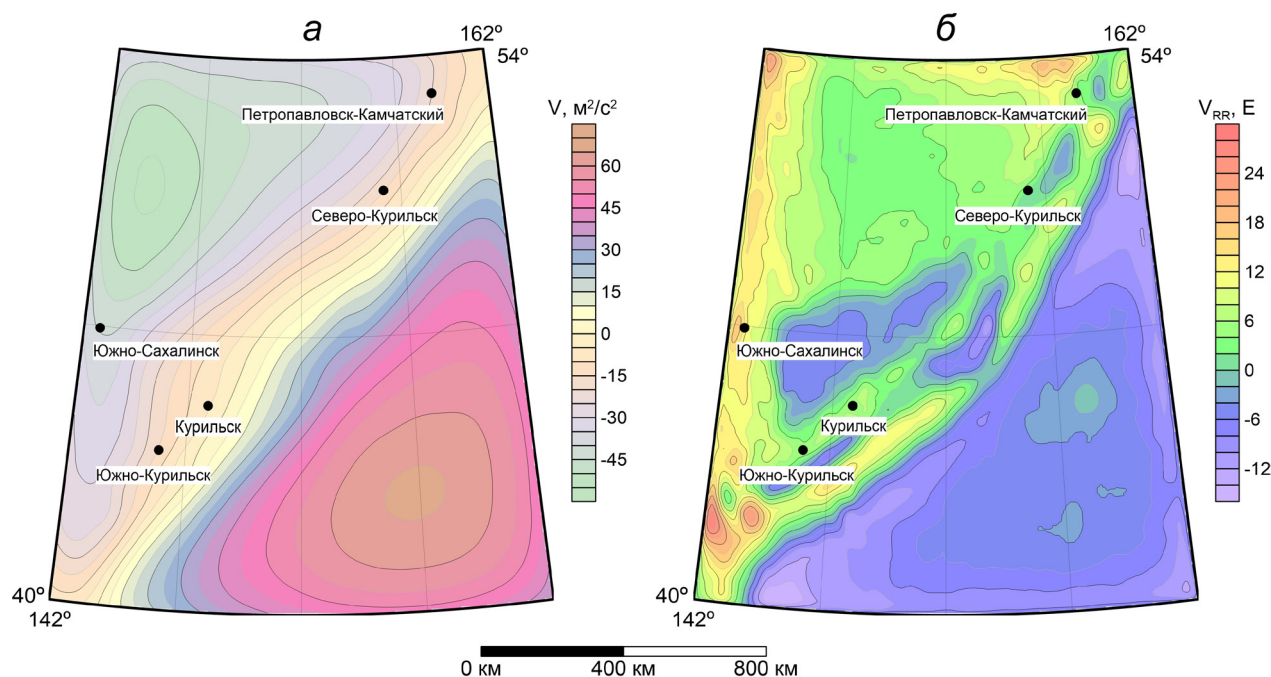


Рис. 4. Карты изолиний гравитационного потенциала V на уровне 10 км (*а*) и 2-й вертикальной производной тяжести V_{RR} на уровне 30 км (*б*).

Fig. 4. Maps of isolines of gravitational potential maps V at the level of 10 km (*a*) and the 2nd vertical derivative of gravity V_{RR} at the level of 30 km (*b*).

вов» (2009). По морфологическим особенностям поля, с использованием имеющегося набора трансформант можно выделить ряд дизъюнктивных нарушений, преимущественно субширотного и северо-западного простирания.

ТОЧНОСТЬ И СКОРОСТЬ ВЫЧИСЛЕНИЯ ТРАНСФОРМАНТ

Ранее авторами выполнялись оценки точности различий аномалий силы тяжести, обусловленных использованием «плоской» и «сферической» моделей Земли при интерпретации материалов гравиметрической съемки в пределах больших территорий (Долгаль А.С. и др., 2019). Установлено, что учет сферичности Земли приводит к существенному повышению точности (от 5% и более) результатов решения прямой задачи гравиразведки, в частности, в пределах листа О-40 (Пермский край) предлагаемая поправка составляет от -2.07 до 5.77 мГал (Долгаль А.С. и др., 2018). Также на модельном примере продемонстрирована целесообразность использования «сферической» модели Земли при пересчете гравитационного поля в верхнее полупространство даже в пределах сравнительно небольшой площади размером $2.4^\circ \times 2.4^\circ$ (Долгаль А.С., 2020б). В цитируемой работе отмечено, что «традиционно выполняющаяся трансформация аномального гравитационного поля в системе прямоугольных координат может порождать артефакты — достаточно интенсивные локальные аномалии

разного знака, не связанные с геоплотностными неоднородностями среды».

С использованием программы APPROX_SF_1 и представленных в настоящей статье гравиметрических материалов была предпринята попытка приближенной оценки различия между «сферической» и «квазиэллипсоидальной» моделями Земли при пересчете аномалий силы тяжести на уровень $H = 50$ км. Для этой цели использовалась разреженная сеть точек $20' \times 20'$, что, с одной стороны привело к улучшению обусловленности СЛАУ (1), т.к. за счет увеличения шага сети влияние рельефа поверхности задания поля D уменьшилось, с другой — существенно снизило вычислительные затраты. При этом обеспечивалась репрезентативность выборки данных, объем которой составляет 2623 значения поля Δg_B .

Аппроксимация гравитационного поля проводилась в двух вариантах: с применением в процессе расчетов преобразования координат по В.В. Каврайскому (3) и без этого преобразования. В первом случае, можно говорить об использовании «квазиэллипсоидальной» модели Земли, во втором — о «сферической». Решение СЛАУ с помощью МЗ при $R^*/L = 1$ в обоих случаях позволило добиться высокой точности аппроксимации исходного поля Δg_B ($F2 = 0.001$ мГал, $FM = 0.005$ мГал) на земной поверхности при выполнении 117–118 итераций за время, не превышающее 2 мин. Две полученные аналитические модели поля $\{m\}$ позволили получить цифровые модели аномалий силы тяжести на

Таблица 2. Статистические характеристики трансформант гравитационного поля и их разности

Table 2. Statistical characteristics of gravitational field transformants and their difference

Параметр	Статистические характеристики, мГал			
	Минимум	Максимум	Среднее	Среднеквадратическое отклонение
Поле на уровне 50 км, «квазиэллипсоидальная» Земля	-187.28	165.13	1.24	121.38
Поле на уровне 50 км, «сферическая» Земля	-187.40	165.15	1.24	121.40
Разность полей δ	-0.13	0.12	-0.01	0.04

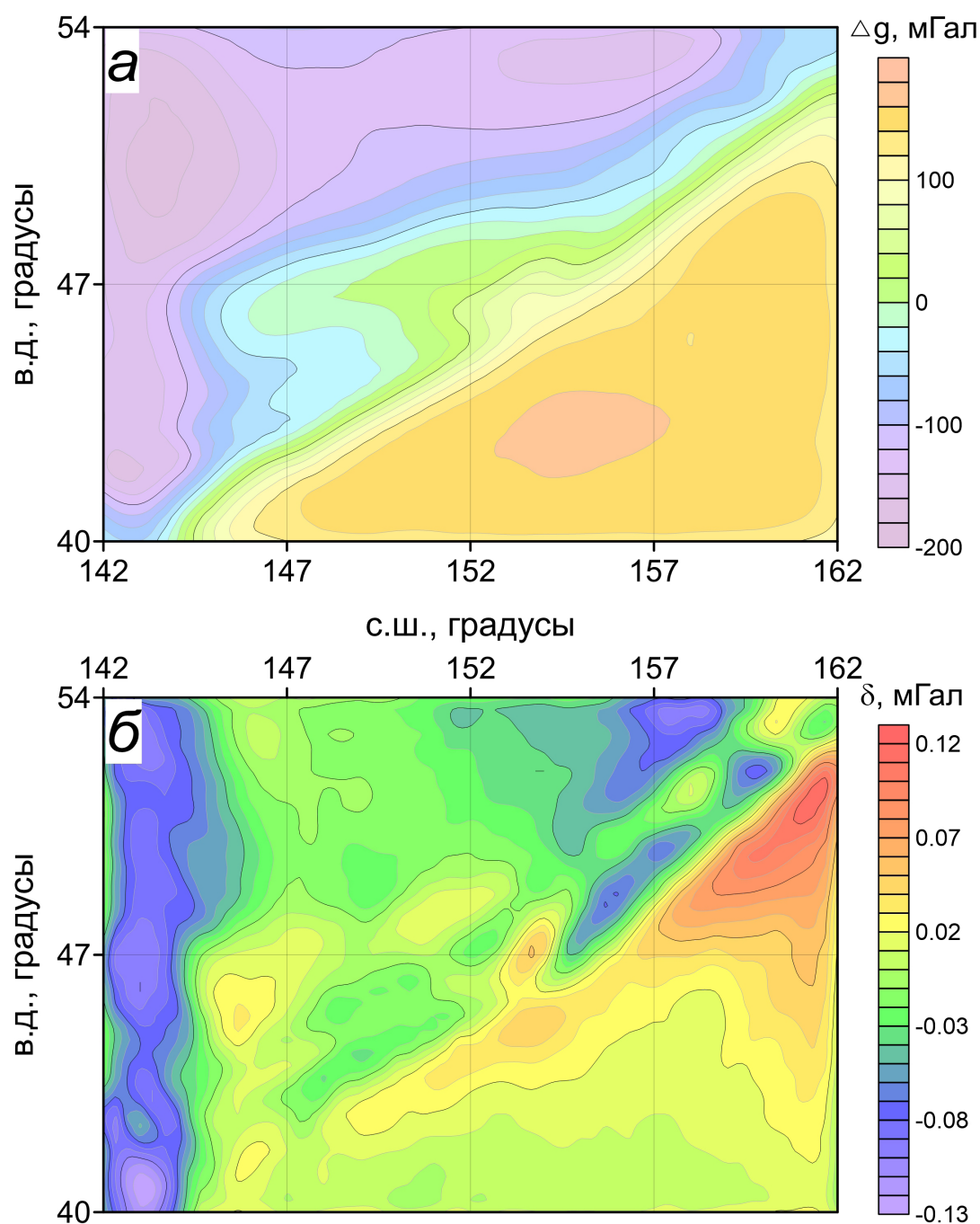


Рис. 5. Карты изоаномал гравитационного поля V_R на уровне 10 км (а) и разности результатов пересчета δ в верхнее полупространство для «сферической» и «квазиэллипсоидальной» моделей Земли (б).

Fig. 5. Maps of gravitational field: V_R at the level of 10 km (а) and the results of recalculation of δ into the upper half-space for the «spherical» and «quasi-ellipsoidal» Earth models (б).

высоте 50 км в узлах сети $20' \times 20'$ и определить их разлечение δ (табл. 2, рис. 5).

Ограничимся одной приближенной оценкой, базирующейся на соотношении дисперсий поля V_R и разности δ , которая свидетельствует о том, что «квазиэллипсоидальная» модель Земли повышает точность пересчета гравитационного поля в верхнее полупространство не более, чем на 0.05% по сравнению со «сферической» моделью. Заметим, что В.Н. Глазнев (2003) со ссылкой на зарубежных авторов (Jonson L.R., Litehiser J.A., 1972) еще в 2003 г писал о практической идентичности сферической и эллипсоидальных поверхностей при расчете региональных полей.

Преимущества использования переменной глубины расположения источников поля $R^* = R^*(\varphi)$, уменьшающейся с ростом широты, очевидны при рассмотрении рис. 6. Решение

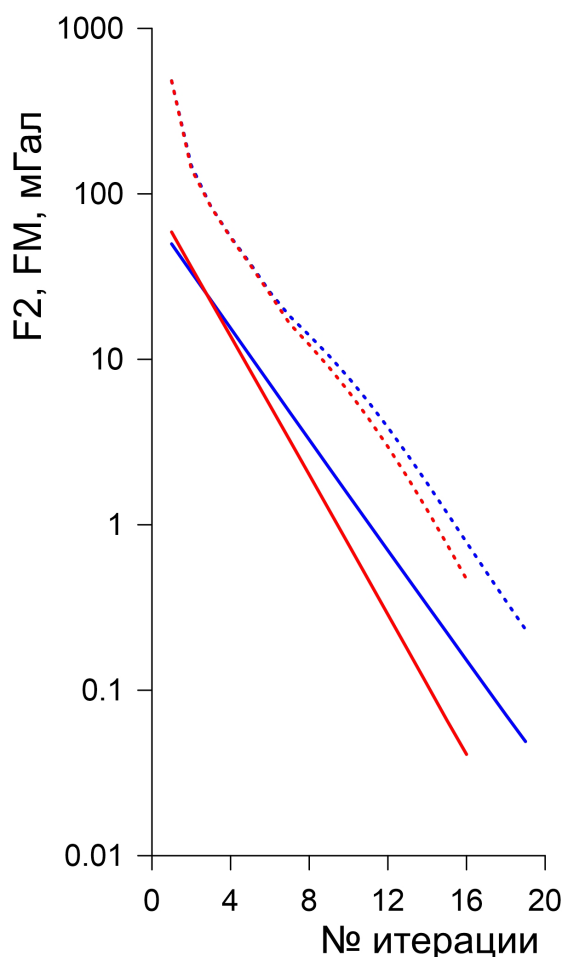


Рис. 6. Зависимость показателей качества решения СЛАУ $F2$ (сплошная линия) и FM (пунктирная линия) от числа итераций при постоянной (синий цвет) и зависящей от широты (красный цвет) глубине R^* источников поля.

Fig. 6. Dependence of the quality indices of solving $F2$ (solid line) and FM (dashed line) on the number of iterations at constant (blue) and latitude-dependent (red) depth R^* of field sources.

СЛАУ (1) относительно 63511 неизвестных значений масс m при переменной глубине источников $R^*(\varphi)$ позволило за 16 итераций достигнуть значений функционалов $F2 = 0.04$ мГал, $FM = 0.47$ мГал. Постоянная глубина источников $R^* = 5.680$ км позволила получить значения $F2 = 0.05$ мГал, $FM = 0.23$ мГал при выполнении 19 итераций.

Созданная программа APPROX_SF_1 представляет собой продукт, относящийся к начальной стадии разработки (pre-alpha) компьютерной технологии, в статье представлены результаты первичной оценки ее функциональных возможностей в действии. Имеются скрытые резервы для повышения быстродействия представленного алгоритма, связанные с оптимизацией циклических вычислений массива коэффициентов G . Также возможна модификация программы для работы на многопроцессорных вычислительных системах.

Увеличение скорости вычислений может быть также обеспечено совершенствованием самого алгоритма трансформации аномалий силы тяжести, в первую очередь это относится к переходу от одноуровневой аппроксимационной конструкции к многоуровневой (Балк П.И. и др., 2016). Более близкое к реальности пространственное распределение аномалиеобразующих масс, находящихся на разных уровнях глубин, позволит снизить влияние эффектов практической неоднозначности при трансформации поля (Пугин А.В., 2018).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Под фигурой Земли понимают тело, ограниченное ее физической поверхностью и невозмущенной поверхностью морей и океанов. Существуют различные приближения фигуры Земли, выбор которых определяется спецификой решаемых задач. В прикладной геофизике при интерпретации данных гравиметрических съемок в подавляющем большинстве случаев используется модель «плоской Земли» и отвечающая ей прямоугольная система координат $\Sigma_{x,y,z}$. Аномалии силы тяжести в редукции Буге при этом отождествляются с вертикальной производной V_z гравитационного потенциала V . Модель «сферической Земли» значительно реже находит применение, преимущественно при изучении больших территорий: здесь при решении прямых и обратных задач гравиразведки используется сферическая система координат $\Sigma_{\varphi,\lambda,r}$ и радиальная производная V_R потенциала V . В математическом отношении эта модель проще, чем более точное приближение фигуры Земли эллипсоидом вращения, местоположение объектов на поверхности которого определяется геодезическими координатами — широтой B и долготой L .

В настоящей статье представлена компьютерная технология трансформации гравитационного поля для больших территорий (с размерами по широте от 6°) в которой используется «квазиэллипсоидальная» модель Земли — сфера Каврайского. Трансформация осуществляется путем построения аналитической модели поля $\Delta g_B = \Delta g_B(B, L)$ с помощью истокообразной аппроксимации и дальнейшим восстановлением требуемых компонент поля решением прямой задачи для полученного пространственного распределения эквивалентных источников. Глубины расположения этих источников зависят от широты B , что влечет за собой увеличение скорости решения СЛАУ при определении параметров аномалиеобразующих масс.

Выполнен расчет трансформант гравитационного поля глобальной модели WGM 2012 для территории, расположенной в пределах 40° – 54° с.ш., 142° – 162° в.д., охватывающей КОД, сопредельные акватории и части суши. Полученный набор трансформант включает в себя региональную $V_R^{\text{рег}}$ и локальную $V_R^{\text{лок}}$ составляющие, гравитационный потенциал V и 2-ю вертикальную производную V_{RR} поля в узлах сети $4' \times 4'$. Полученные карты и цифровые модели поля могут использоваться для качественной интерпретации или в качестве признаков при дальнейшей классификации многомерных данных при комплексном анализе (Петров А.В., Трусов А.А., 2000).

Осуществлена экспериментальная оценка применения «сферической» и «квазиэллипсоидальной» моделей Земли при пересчете аномалий силы тяжести в верхнее полупространство на высоту 10 км. Установлено весьма слабое различие полученных результатов, не превышающее 0.05%. Степень отличия «плоской» и «сферической» моделей на два порядка выше (Долгаль А.С., 2020б). Это позволяет предположить, что работа с более точными, чем сфера Каврайского, приближениями фигуры Земли в процессе трансформации гравиметрических данных при региональных исследованиях вряд ли является целесообразной.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от «29» декабря 2020 г. (рег. номер 122012000398-0).

Список литературы [References]

Аронов В.И. Методы построения карт геолого-геофизических признаков и геометризация залежей нефти и газа на ЭВМ. Недра, Москва, 1990. 301 с. [Aronov V.I. Metody postroyeniya kart geologo-geofizicheskikh priznakov i geometrizatsiya zalezhey nefti i gaza na EVM. Nedra, Moskva, 1990. 301 p. (in Russian)].

Атлас Курильских островов / Отв. ред. Е.А. Федорова. Институт географии РАН; Тихоокеанский институт географии ДВО РАН. М.; Владивосток: ИПЦ «ДИК», 2009. 516 с. [Atlas Kuril'skikh ostrovov / Otv. red. Ye.A. Fedorova. Institut geografiy RAN; Tikhookean. institut geografii DVO RAN. M.; Vladivostok: IPTS «DIK», 2009. 516 p. (in Russian)].

Балк П.И., Долгаль А.С., Пугин А.В. и др. Эффективные алгоритмы истокообразной аппроксимации геопотенциальных полей <https://doi.org/10.7868/S0002333716050021> // Физика Земли. 2016. № 6. С. 112–128 [Balk P.I., Dolgal A.S., Pugin A.V. et al. Effective algorithms for sourcewise approximation of geopotential fields // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2016. T. 52. № 6. P. 896–911. <https://doi.org/10.1134/S1069351316050025>]

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. Chislennyye metody. 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. et al. Vozdushnaya navigatsiya: spravochnik. M.: Transport, 1988. 303 p. (in Russian)].

Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике: справочник геофизика / Под ред. В.М. Дмитриева. 2-е издание, переработанное и дополненное М.: Недра, 1990. 498 с. [Vychislitel'naya matematika i tekhnika v razvedochnoy geofizike: spravochnik geofizika / Pod red. V.M. Dmitriyeva. 2-ye izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe. M.: Nedra, 1990. 498 p. (in Russian)].

Глазнев В.Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. Апатиты: КаЭМ, 2003. 250 с. [Glaznev V.N. Kompleksnyye geofizicheskiye modeli litosfery Fennoskandii. Apatity, KaeM, 2003. 250 p. (in Russian)].

Глазнев В.Н., Якуба И.А. Мощность земной коры территории Республики Нигер по данным стохастической интерпретации гравитационного поля // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2020. № 4. С. 46–58. <https://doi.org/10.17308/geology.2020.4/3126> [Glaznev V.N., Yakuba I.A. Determining the thickness of the Earth's crust in the territory of the Republic of the Niger based on the stochastic interpretation of the gravitational field // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. 2020. № 4. P. 46–58 (in Russian)].

Гравиразведка: Справочник геофизика / Под ред. Е.А. Мудрецов, К.Е. Веселова. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Недра, 1990. 607 с. [Gravirazvedka: Spravochnik geofizika / Pod red. E.A. Mudretsovoy, K.E. Veselova. 2-ye izd. pererab. i dop. M.: Nedra, 1990. 607 p. (in Russian)].

Долгаль А.С. Оценка влияния формы поверхности измерений в методе истокообразной аппроксимации геопотенциальных полей // Горное эхо. 2020а. № 2 (79). С. 49–57 [Dolgal A.S. Otsenka vliyaniya formy poverkhnosti izmereniy v metode istokoobraznoy approksimatsii geopotentsial'nykh poley // Gornoye ekho. 2020a. № 2 (79). P. 49–57 (in Russian)].

Долгаль А.С. Оценка точности трансформации аномалий силы тяжести для плоской и сферической

- моделей Земли // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики: сборник научных трудов / Гл. ред. В.И. Костицын; Пермский государственный национальный исследовательский университет. Пермь. 2020б. С. 48–52 [*Dolgal' A.S. Otsenka tochnosti transformatsii anomal'nykh sil tyazhesti dlya ploskoy i sfericheskoy modeley Zemli // Teoriya i praktika razvedochnoy i promyslovoy geofiziki: sbornik nauchnykh trudov / Gl. red. V.I. Kostitsyn; Permskiy gosudarstvennyy natsional'nyy issledovatel'skiy universitet. Perm'. 2020b. P. 48–52 (in Russian).*].
- Долгаль А.С., Бычков С.Г., Костицын В.И. и др. Моделирование гравитационных эффектов, обусловленных влиянием сферичности Земли. // Геофизика. 2018. № 5. С. 50–57 [*Dolgal A.S., Bychkov S.G., Kostitsyn V.I. et al. Modelirovaniye gravitatsionnykh effektiv, obuslovlennyykh vliyaniyem sferichnosti Zemli // Geofizika. 2018. № 5. P. 50–57 (in Russian).*].
- Долгаль А.С., Бычков С.Г., Костицын В.И. и др. Приближенная 3D-оценка гравитационных аномалий, обусловленных шарообразной формой Земли // Геофизика. 2019. № 5. С. 56–62 [*Dolgal A.S., Bychkov S.G., Kostitsyn V.I. et al. Priblizhennaya 3D otsenka gravitatsionnykh anomal'nykh, obuslovlennyykh sharoobraznoy formoy Zemli // Geofizika. 2019. № 5. P. 56–62 (in Russian).*].
- Долгаль А.С., Бычков С.Г., Симанов А.А. и др. Основные элементы технологии учета гравитационного влияния топографических масс для шарообразной Земли // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 4. Вып. 28. С. 40–46 [*Dolgal A.S., Bychkov S.G., Simanov A.A. et al. // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2015. № 4 (28). P. 40–46 (in Russian).*].
- Долгаль А.С., Костицын В.И., Новикова П.Н. и др. Аппроксимация аномалий силы тяжести при региональных исследованиях с учетом шарообразной формы Земли // Геофизика. 2021а. № 5. С. 36–43 [*Dolgal A.S., Kostitsyn V.I., Novikova P.N. et al. Approksimatsiya anomal'nykh sil tyazhesti pri regional'nykh issledovaniyakh s uchetoм sharoobraznoy formy Zemli // Geofizika. 2021a. № 5. P. 36–43 (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 Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. 2021б. № 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 Ye.N. et al. «Tomographic transformation» of anomalous magnetic field using grid distribution of equivalent sources // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2021b. № 1(49). P. 10–23 (in Russian).*].
- Долгаль А.С., Пугин А.В., Новикова П.Н. История метода истокообразных аппроксимаций геопотенциальных полей // Физика Земли. 2022. Т. 2. № 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. 2. № 2. P. 3–26. https://doi.org/10.1134/S1069351322020021*].
- Каврайский В.В. Математическая картография. М.: Редбаза Госкартотреста, 1934. 276 с. [*Kavrayskiy V.V. Matematicheskaya kartografiya. M.: Redbaza Goskartotresta, 1934. 276 p. (in Russian).*].
- Конешов В.Н., Непоклонов В.Б., Соловьев В.Н. Сравнение глобальных моделей аномалий гравитационного поля Земли с аэрогравиметрическими измерениями при трансконтинентальном перелете // Гироскопия и навигация. СПб. 2014. № 2 (85). С. 86–94 [*Koneshov V.N., Nepoklonov V.B., Solovyev V.N. Comparison of the global models for the terrestrial gravitational field anomaly with the aerogravimetric measurements during the transcontinental flight // Gyroscopy and Navigation. SPb. 2014. № 2 (85). P. 86–94 (in Russian).*].
- Конешов В.Н., Непоклонов В.Б., Соловьев В.Н. и др. Сравнение современных глобальных ультровысокостепенных моделей гравитационного поля Земли <https://doi.org/10.21455/gr2019.1-2> // Геофизические исследования. 2019. Т. 20. № 1. С. 13–26. [*Koneshov V.N., Nepoklonov V.B., Solovyev V.N. et al. Sravneniye sovremennykh global'nykh ul'trovyssokostepennykh modeley gravitatsionnogo polya Zemli // Geofizicheskiye issledovaniya. 2019. T. 20. № 1. P. 13–26 (in Russian).*].
- Лебедев Л.П. Картография: Учебное пособие для вузов. М.: Академический проект; Трикта, 2017. 153 с. [*Lebedev L.P. Kartografiya: Uchebnoye posobiye dlya vuzov. M.: Akademicheskii proyekt; Triksa, 2017 (in Russian).*].
- Мартышко П.С., Ладовский И.В., Бызов Д.Д., Чернскутово А.И. О решении прямой задачи гравиметрии в криволинейных и декартовых координатах: эллипсоид Красовского и «плоская» модель. <https://doi.org/10.1134/S0002333718040075> // Физика Земли. 2018. № 4. С. 31–39 [*Martyshko P.S., Ladovsky I.V., Byzov D.D., Chernskutov A.I. On solving the forward problem of gravimetry in curvilinear and Cartesian coordinates: Krasovskii's ellipsoid and plan modeling // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2018. T. 54. № 4. P. 565–573. https://doi.org/10.1134/S1069351318040079*].
- Муравьев Л.А. Общеземные базы данных гравитационного поля земли на территорию приарктической части Уральского региона // Уральский геофизический вестник. 2019. № 2(36). С. 46–53 [*Muravyev L.A. Obshchezemnyye bazy dannykh gravitatsionnogo polya zemli na territoriyu priarkticheskoy chasti Ural'skogo regiona // Uralskiy geofizicheskiy vestnik. 2019. № 2(36). P. 46–53 (in Russian).*].
- Петрищевский А.М. Земная кора и верхняя мантия в области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского складчатых поясов // Тихоокеанская геология. 2021. Т. 40. № 5. С. 16–32. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-5-16-32> [*Petrishchevskiy A.M. Crust and upper mantle in the zone of junction between the Central Asian and Pacific fold belts // Russian Journal of Pacific Geology. 2021. T. 40. № 5. P. 401–416. https://doi.org/10.1134/S1819714021050080*].
- Петров А.В., Трусов А.А. Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа трехмерной геоинформации — КОСКАД 3D // Геофизика. 2000. № 4. С. 29–33 [*Petrov A.V., Trusov A.A. Komp'yuternaya tekhnologiya statisticheskogo i spektral'no-korrelyatsionnogo analiza trekhmernoy geoinformatsii — KOSKAD 3D // Geofizika. 2000. № 4. P. 29–33 (in Russian).*].

- Пугин А.В. Истокообразные аппроксимации геопотенциальных полей. От теории к практике. <https://doi.org/10.21455/gr2018.4-2> // Геофизические исследования. 2018. Т. 19. № 4. С. 16–30 [Pugin A.V. Sourcewise approximation of geopotential fields. From theory to practice // Geofizicheskiye issledovaniya. 2018. T. 19. № 4. P. 16–30 (in Russian)].
- Раевский Д.Н., Степанова И.Э. Модифицированный метод S-аппроксимаций. Региональный вариант // Физика Земли. 2015. № 2. С. 44–54. <https://doi.org/10.7868/S0002333715020106> [Rayevsky D.N., Stepanova I.E. The modified method of S-approximations: Regional version // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2015. № 2. P. 197–206. <https://doi.org/10.1134/S1069351315020093>]
- Сеначин В.Н., Веселов О.В., Семакин В.П. и др. Цифровая модель земной коры Охотоморского региона // Геоинформатика. 2013. № 4. С. 33–44 [Senachin V.N., Veselov O.V., Semakin V.P. et al. Digital model of the earth's crust of the Okhotsk sea region // Geoinformatics. 2013. № 4. P. 33–44 (in Russian)].
- Серापинас Б.Б. Математическая картография: Учебник для вузов. М.: Издательский центр «Академкнига», 2005. 336 с. [Serapinas B.B. Mathematical Cartography: Textbook for High Schools. M.: Publishing center «Akademkniga», 2005. 336 p. (in Russian)].
- Степанова И.Э., Раевский Д.Н., Щепетилов А.В. Об интерпретации больших объемов данных гравимагниторазведки с помощью модифицированного метода S-аппроксимаций // Физика Земли. 2017. № 1. С. 123–137. <https://doi.org/10.7868/S0002333716060119> [Stepanova I.E., Raevsky D.N., Shechetilov A.V. On the interpretation of large gravimagnetic data by the modified method of S-approximations // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2017. V. 53. № 1. P. 11–129. <https://doi.org/10.1134/S1069351316060112>]
- Страхов В.Н. Главнейшая задача в развитии теории и практики интерпретации потенциальных полей в начале XXI века — разрушение господствующего стереотипа мышления // Геофизика. 2001. № 1. С. 3–18 [Strakhov V.N. Glavneyshaya zadacha v razvitii teorii i praktiki interpretatsii potentsial'nykh poley v nachale XXI veka — razrusheniye gospodstvuyushchego stereotipa myshleniya // Geofizika. 2001. № 1. P. 3–18 (in Russian)].
- Страхов В.Н., Степанова И.Э. Метод S-аппроксимаций и его использование при решении задач гравиметрии (региональный вариант) // Физика Земли. 2002. № 7. С. 3–12 [Strakhov V.N., Stepanova I.E. Solution of Gravity Problems by the S-Approximation Method (Regional Version) // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2002. V. 38, № 7. P. 535–544].
- Amante C., Eakins B.W. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 2009.
- Balmino G., Vales N., Bonvalot S. et al. Spherical harmonic modelling to ultra-high degree of Bouguer and isostatic anomalies // Journal of Geodesy. 2012. V. 86. P. 499–520. <https://doi.org/10.1007/s00190-011-0533-4>
- Bonvalot S., Balmino G., Briais A. et al. Commission for the Geological Map of the World. Eds. BGI-CGMW-CNES-IRD. Paris, 2012.
- Jonson L.R., Litehiser J.A. A method for computing the gravitational attraction of three-dimensional bodies in a spherical or ellipsoidal Earth // Journal of Geophysical Research. 1972. V. 77. Iss. 35. P. 6999–7009.

TRANSFORMATION OF GRAVITY ANOMALIES WITHIN LARGE TERRITORIES (BY THE EXAMPLE OF THE KURIL ISLAND ARC)

© 2022 A.S. Dolgal¹, P.N. Novikova¹, A.V. Pugin¹, V.A. Rashidov²

¹Mining Institute UB RAS, Perm, Russia, 614007

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

Received May 25, 2022; revised June 09, 2022; accepted June 27, 2022

An algorithm and a program for transformation of gravity anomalies for large territories are presented. The spherical shape of Earth is taken into account and the geodetic coordinates of measuring points are used. The calculations use the «quasi-ellipsoidal» model of V.V. Kavraisky, which allows the transition from geodesic to spherical coordinate system with increased accuracy. The algorithm is based on a source-like approximation of the field values, located in the nodes of a regular network, with the depths of the equivalent sources, depending on the latitude. To determine the source masses, the system of linear algebraic equations is solved by the fastest gradient descent method with an accelerated step calculation. The results of transformation of the gravity field in the Bouguer reduction for the Kuril island arc, the adjacent water areas and parts of land, located within 40°–54° N, 142°–162° E are presented with a total area of about 2.4 million km². A slight difference between the recalculation results of gravity anomalies into the upper half-space using the «spherical» and «quasi-ellipsoidal» models of the Earth was experimentally established.

Keywords: gravity, transformation, Kavraisky sphere, Kuril island arc.