

УДК 550.83

А.С. Долгаль, А.А. Симанов, В.В. Хохлова
Горный институт УрО РАН, г. Пермь, e-mail: dolgal@mi-perm.ru

Решение геокартировочных и прогнозно-поисковых геологических задач методом гравиразведки с учетом сферичности Земли

Рассматриваются вопросы, связанные с учетом влияния сферичности Земли при моделировании геоплотностных неоднородностей по результатам измерения гравитационного поля в пределах сравнительно небольших по размерам площадей (профилей). Приведены модельные примеры, свидетельствующие о заметных различиях аномальных эффектов на «плоской» и «сферической» Земле, обусловленных одними и теми же возмущающими объектами. Эти различия создают субвертикальное перемещение масс при геометризации модели, связанное с изменением формы земной поверхности. Размер площади составляет 200×200 км, длина профиля – 300 км. Предложен новый адаптивный кубатурный алгоритм вычисления ускорения силы тяжести V_R для сферического параллелепипеда. Проведено его сравнение с известным алгоритмом, использующим квадратурные формулы Гаусса-Лежандра и другими методами численного интегрирования. Новый алгоритм может использоваться в дальнейшем для решения многих практических задач гравиразведки, в т.ч. для расчета поправок за влияние рельефа местности на сферической Земле.

Ключевые слова: гравиразведка, аномалия, сферическая Земля, интерпретация, модель, сферический параллелепипед, численное интегрирование.

При решении подавляющего большинства геокартировочных и прогнозно-поисковых геологических задач методом гравиразведки в силу ограниченных размеров изучаемых площадей сферичностью Земли пренебрегают. Существуют различные мнения по поводу целесооб-

разности учета сферичности Земли при обработке и интерпретации материалов гравиметрических съемок. По представлениям В.Н. Страхова такой учет необходимо проводить для территорий, обладающих линейными размерами более 100 км (Страхов, 2000).

Окончание статьи Н.С. Гатиятуллина, Э.Р. Казакова, В.В. Либермана «Оценка состояния ресурсной базы твердых нерудных полезных ископаемых Республики Татарстан»

Литература

Хисамов Р.С., Гатиятуллин Н.С., Либерман В.В., Шаргородский И.Е., Хадиуллина Р.Н., Войтович С.Е. Минерально-сырьевая база Республики Татарстан. Казань: Фэн. 2006. 320 с.

Шаргородский И.Е., Либерман В.В. Екимцов С.А., Казаков Э.Р. Комплексная территориально-дифференцированная оценка минерально сырьевой базы Республики Татарстан с использованием ГИС-технологий. Тезисы докладов 7-й Всерос. научно-практ. конф. «Геоинформатика в нефтегазовой и горной отраслях». Бугульма. 2003. С. 23-25.

Сведения об авторах

Накип Салахович Гатиятуллин – доктор геол.-мин. наук, Руководитель Татарстанской нефтяной секции ЦКР Роснедр по УВС.

Эдуард Рафаилович Казаков – канд. геогр. наук, ведущий геолог Информационно-аналитического центра.

Владимир Борисович Либерман – начальник Информационно-аналитического центра.

Татарское геологоразведочное управление ПАО «Татнефть», 420111 г. Казань, ул. Чернышевского 23/25. Тел: (843) 292-67-71

Evaluation of solid non-metallic mineral resource base in the Republic of Tatarstan

N.S. Gatiyatullin, E.R. Kazakov, V.B. Liberman

Tatar Geological Exploration Department PJSC Tatneft, Kazan, Russia, e-mail: tgru@tatneft.ru

Abstract. The current state of solid non-metallic mineral resource base in Tatarstan is shown in this paper. Detailed qualitative and quantitative characteristics of construction, agriculture and mining resources are given. Features are shown of complex territorial differentiation by mineral and raw materials potential. Value appraisal is considered of reserves and resources of all kinds of non-metallic minerals.

Keywords: mineral base, solid non-metallic minerals, raw material, field, reserves and resources, zoning, Republic of Tatarstan.

References

Khisamov R.S., Gatiyatullin N.S., Liberman V.B., Shargorodskiy I.E., R.N. Khadiullina, Voytovich C.E. Mineral'no-syr'evaya baza Respubliki Tatarstan [Mineral raw material base of Tatarstan Republic]. Kazan: Fen Publ. 2006. 320 p. (In Russian)

Shargorodskiy I.E., Liberman V.B. Ekimtov S.A., Kazakov E.R.

Complex territorial and differentiated assessment of the mineral resources base of the Republic of Tatarstan with the use of GIS technologies. *Tezisy dokladov 7-y Vseros. nauchno-prakt. konf. «Geoinformatika v neftegazovoy i gornoy otraslyakh»* [Abstracts. 7th All-Russian Sci. and Pract. Conf. «Geoinformatics in oil, gas and mining industries]. Bugulma. 2003. Pp. 23-25. (In Russian)

Information about authors

Nakip S. Gatiyatullin – Doctor of Science (Geol. and Min.), Head of the Tatar Division of Central Committee on Oil and Gas Development of Russia (TsKR Rosnedr)

Eduard R. Kazakov – PhD (Geogr.), Leading Geologist of the Information and Analysis Center.

Vladimir B. Liberman – Head of the Information and Analysis Center.

Tatar Geological Exploration Department PJSC Tatneft.

420111, Russia, Kazan, Chernyshevsky St. 23/25.

Phone: +7 (843) 292-67-71

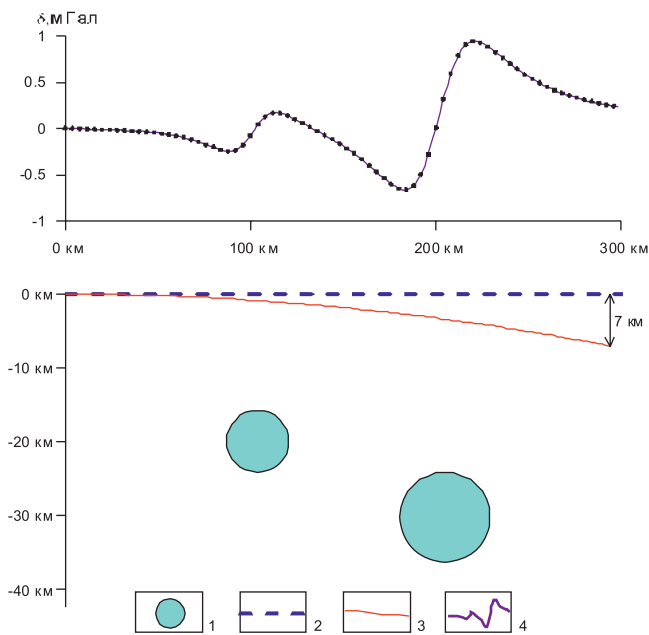


Рис. 1. График разности гравитационных аномалий, полученных в рамках плоской и сферической моделей Земли: 1 – аномалиеобразующие объекты; поверхности измерений: 2 – плоская, 3 – сферическая; 2 – график разности V_z и V_R

В.Н. Сеначин с соавторами (Сеначин и др., 2015) полагают, что это необходимо лишь при построении региональных геоплотностных моделей с площадью более 20 млн км². Ю.В. Пятаков, В.И. Исаев считают, что «когда изучаемые структуры имеют протяженности порядка тысячи километров и более, необходимо учитывать сферичность Земли» (Пятаков, Исаев, 2012). Авторы статьи полностью разделяют приведенное выше мнение В.Н. Страхова применительно к обработке данных гравиметрических съемок, в т.ч. крупномасштабных (Бычков и др., 2015).

Вопрос о влиянии сферичности Земли следует рассматривать в двух аспектах – применительно к качественной и количественной интерпретации материалов гравиразведки.

Качественная интерпретация гравиметрических карт, основанная на анализе морфологических особенностей аномалий силы тяжести в редукции Буге, проводится с целью выделения пликативных и дизъюнктивных геологических структур, а также локализации перспективных площадей для дальнейшего изучения. Сферичность Земли на результаты качественной интерпретации заметного влияния не оказывает. Плановое положение аномалий силы тяжести и отвечающих им геологических объектов совпадает, поэтому все интерпретационные построения могут выполняться в любой системе координат. Геодезические координаты относятся к обще-

| X , км | Y , км | H , км | Радиус шара r , км | Плотность, г/см ³ |
|----------|----------|----------|----------------------|------------------------------|
| 150 | 25 | 5 | 3 | 0.5 |
| 100 | 100 | 12 | 8 | 0.3 |
| 35 | 175 | 8 | 5 | 0.25 |
| 125 | 45 | 7.2 | 4.5 | 0.15 |
| 15 | 50 | 10 | 5 | 0.2 |

Табл. 1. Параметры аномалиеобразующих тел. Примечание: начало системы координат ΣXYZ – левый нижний угол площади, ось OZ направлена вниз.

земному эллипсоиду, размеры и форма которого определяются значениями большой полуоси и сжатия (ПЗ-90.11). Для получения плоских прямоугольных координат в принятой на территории Российской Федерации проекции Гаусса-Крюгера используются геодезические координаты на эллипсоиде Красовского. При этом преобразование геодезических координат в плоские прямоугольные координаты и обратно осуществляется по стандартным формулам, приведенным в ГОСТ Р 51794-2008 (ГОСТ 32453-2013).

Традиционные подходы к количественной интерпретации гравитационных аномалий базируются на решение прямых и обратных задач гравиразведки для первой вертикальной производной потенциала V_z в прямоугольных координатах ΣXYZ , т.е. используют модель «плоской Земли». Представления о сферической Земле уже могут потребоваться при количественной интерпретации материалов среднемасштабных гравиметрических съемок. Если пренебречь полярным сжатием нашей планеты, то можно считать, что Земля имеет форму шара с радиусом $R=6371$ км. Данная модель, как показано целым рядом исследователей, успешно может использоваться для решения подавляющего большинства прикладных задач (Jonson, Litchiser, 1972), например, при изучении литос-

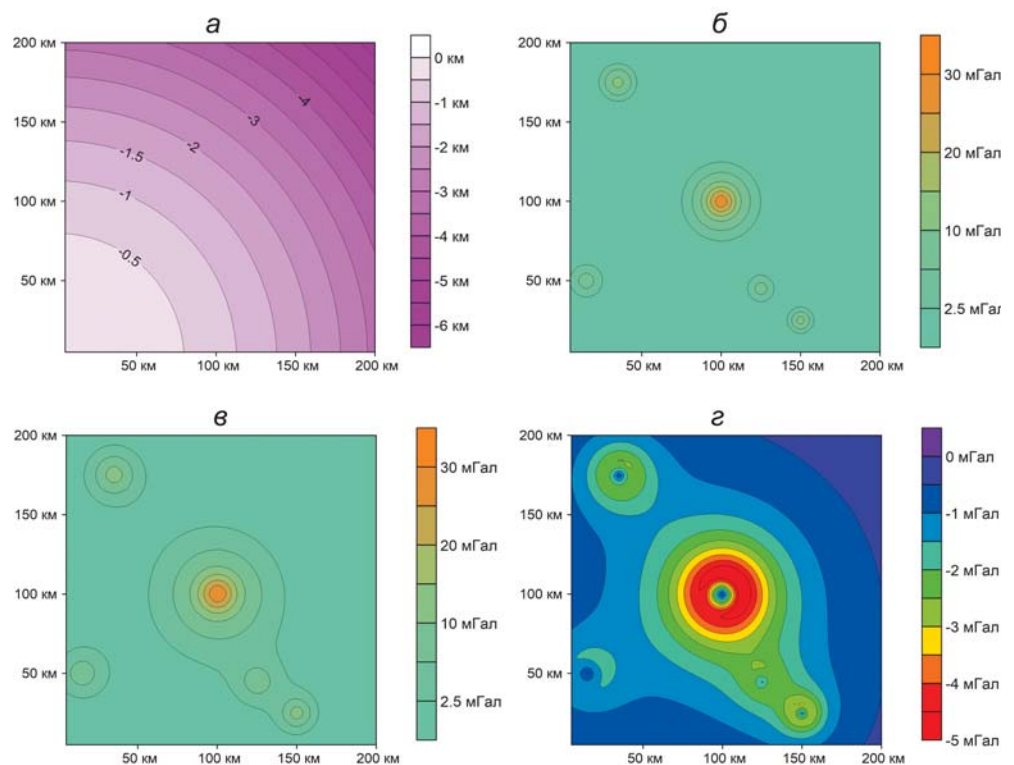


Рис. 2. Разность аппликат Z сферической и плоской моделей Земли (а); гравитационное поле: V_z на плоскости $Z=0$ (б), V_R на сферической поверхности (в); разность полей б и в (г).

феры Фенноскандии (Глазнев, 2003). При этом для описания геометрии источников и местоположения точек расчета поля применяется сферическая система координат $\Sigma r\varphi\lambda$, а интерпретируемые значения силы тяжести отождествляются с ускорением силы тяжести (радиальной производной V_R гравитационного потенциала).

Оценку погрешности вычисления аномального эффекта при отказе от адекватной сферической поверхности наблюдений в пользу идеализированной плоской модели продемонстрируем на простых модельных примерах, отвечающих 1D (профильным) и 2D (площадным) гравиметрическим измерениям (Долгал и др., 2014).

Пример 1. Профиль гравиметрических измерений длиной 300 км проходит по меридиану от северного полюса к югу и включает в себя 151 точку измерений. В нижнем полупространстве располагаются 2 аномалиеобразующих объекта – шары диаметром 8 и 12 км, обладающие избыточной плотностью 0.1 и 0.15 г/см³, соответственно. Центры шаров в системе ΣXYZ имеют координаты $x_1=100, z_1=20; x_2=200, z_2=30$ (в км), профиль проходит непосредственно над ними ($y=0$). Использование канонической формулы $x^2+y^2+z^2=R^2$ для поверхности наблюдений свидетельствует, что различия в вертикальных координатах точек измерений достигают 7 км (Рис. 1).

Максимальная амплитуда аномалии вертикальной составляющей силы тяжести V_z^{\max} на горизонтальной плоскости $z=0$ составляет ~67.2 мГал. Теперь представим, что на сферической Земле выполняются измерения ускорения силы тяжести V_R , при этом отсчет глубин до центров возмущающих тел также проводится от поверхности наблюдений. На рис. 1 представлен график разности d значений V_z и V_R , изменяющейся в диапазоне от -1.55 до 1.34 мГал (что составляет более 4% от V_z^{\max}).

Пример 2. Площадь гравиметрических измерений имеет форму квадрата со стороной 200 км, сеть измерений 2×2 км. Аномалии силы тяжести обусловлены пятью шарами, параметры которых приведены в табл. 1. Глубины центров сфер H отсчитываются от поверхности измерений.

Отклонения сферической поверхности Земли от горизонтальной плоскости достигают 6 км и более (Рис. 2а), максимальная амплитуда аномалий силы тяжести составляет около 29 мГал (Рис. 2б, 2в). Разность значений V_z и V_R лежит в интервале от -4.94 мГал до -0.26 мГал (Рис. 2г).

Как очевидно, различия гравитационного поля для идеализированной (плоской) и квазиреальной (сферической) интерпретационных моделей являются нелинейными и достаточно значительными, поэтому можно поставить вопрос о целесообразности их учета в процессе количественной интерпретации материалов гравиметрических съемок масштаба 1:200 000 – 1:100 000. Физической природой этих изменений является, в первую очередь, субвертикальное перемещение источников поля при геометризации модели, обусловленное изменением формы земной поверхности. Различия между компонентами поля V_z и V_R для сравнительно небольших по размерам площадей играют второстепенную роль.

Необходимым условием адекватности геоплотностных моделей реальным физико-геологическим условиям является близость наблюдаемого и модельного полей (Булах, 2010). Интерпретируемое поле зафиксировано на ша-

рообразной Земле, поэтому для вычисления модельного поля в ситуациях, близких к рассмотренным в примерах 1 и 2, целесообразно использовать модельные аппроксимирующие тела с элементами сферичности. В противном случае, из-за неустойчивости решения обратной задачи гравиразведки, объективно существующие различия гравитационных эффектов могут привести к существенным искажениям геометрии моделируемых объектов.

Элементарным аппроксимирующим телом для решения прямой и обратной задач гравиразведки с учетом сферичности Земли может служить сферический параллелепипед (СП) – фрагмент Ω шара радиусом R с центром, совпадающим с началом координат O сферической системы координат $\Sigma r\varphi\lambda$, помещенным в центр Земли (Фихтенгольц, 1963). 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:

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

где $r_0 = \sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr \cos \omega}$, f – гравитационная постоянная, σ – плотность тела; r, φ, λ – переменные интегрирования, ω – угол при центре шара между точками P и M :

$\cos \omega = \cos \varphi_0 \cos \varphi + \sin \varphi_0 \sin \varphi \cos(\lambda_0 - \lambda)$ (Рис. 3). Интеграл (1) не имеет аналитического решения, поэтому для расчета гравитационного эффекта в данном случае приходится прибегнуть к численному интегрированию.

В.И. Старостенко с соавторами для решения этой задачи предложен адаптивный смешанный алгоритм, использующий квадратурные формулы Гаусса-Лежандра (Старостенко, Манукян, 1983). Однократное интегрирование (по переменной r), осуществляется аналитически, остав-

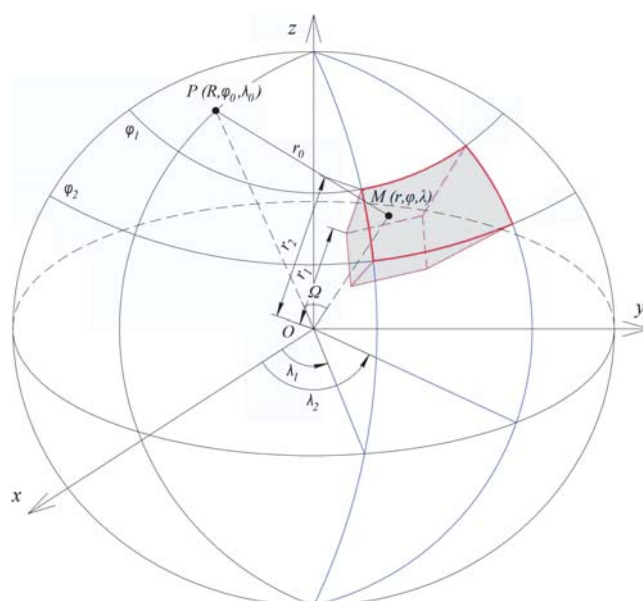


Рис. 3. Сферический параллелепипед.

шийся двукратный интеграл решается названным численным методом. Надо сказать, что аналитическое интегрирование заметно усложняет вид подынтегральной функции (в частности, появляются слагаемые, включающие в себя логарифмическую функцию), что неизбежно сказывается на последующей скорости вычисления двойного интеграла по переменным φ, λ .

С учетом требований, сформулированных В.Н. Страховым в отношении точности, быстродействия и устойчивости алгоритмов решения прямых задач (Страхов, 1985), а также исходя из возможностей современных компьютеров, авторами разработано теоретико-программное обеспечение задачи вычисления интеграла (1), основанное на адаптивном кубатурном алгоритме, весьма эффективным при вычислении интегралов от функций с особенностями (Бахвалов и др., 2000).

Примем сокращенные обозначения: $\psi(X)$ – подынтегральная функция в выражении (1), $X = (r; \varphi, \lambda)$, $\Omega = \{r_1 \leq r \leq r_2, \lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2, \varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2\}$. Заменой переменных $r = (r_1 + r_2)/2 + t_1(r_1 - r_2)/2$, $\varphi = (\varphi_1 + \varphi_2)/2 + t_2(\varphi_1 - \varphi_2)/2$, $\lambda = (\lambda_1 + \lambda_2)/2 + t_3(\lambda_1 - \lambda_2)/2$, интеграл (1) преобразуется в интеграл по кубу:

$$f \sigma \iiint_{\Omega} \psi(X) dX = f \sigma \iiint_G g(t) dt, \quad (2)$$

где $G = \{-1 \leq t_1 \leq 1, -1 \leq t_2 \leq 1, -1 \leq t_3 \leq 1\}$. Для его вычисления предлагаются три кубатурные формулы:

$$\iiint_G g(t) dt \approx Q_q(g), \quad q = 1, 2, 3. \quad (3)$$

$$Q_1 = \frac{8}{225} \left[44g(0,0,0) + \frac{121}{8} \sum_{|i|,|j|,|k|=1} g\left(i\sqrt{\frac{5}{11}}, j\sqrt{\frac{5}{11}}, k\sqrt{\frac{5}{11}}\right) + 10 \sum_{|i|+|j|+|k|=1} g(i, j, k) \right]$$

$$Q_2 = \frac{8}{1225} \left[\frac{-1552}{5} g(0,0,0) + \frac{1573}{40} \sum_{|i|,|j|,|k|=1} g\left(i\sqrt{\frac{5}{11}}, j\sqrt{\frac{5}{11}}, k\sqrt{\frac{5}{11}}\right) + \frac{784}{5} \sum_{|i|+|j|+|k|=1} g\left(i\sqrt{\frac{5}{14}}, j\sqrt{\frac{5}{14}}, k\sqrt{\frac{5}{14}}\right) + 15T \right],$$

$$T = \sum_{|i|,|j|=1} g(i, j, 0) + \sum_{|i|,|k|=1} g(i, 0, k) + \sum_{|j|,|k|=1} g(0, j, k),$$

$$Q_3 = \frac{4}{9} Q_1 + \frac{5}{9} Q_2.$$

Индексы суммирования i, j, k здесь могут принимать только фиксированные значения: -1, 0, 1. Формулы Q_1 и Q_2 являются точными для всех многочленов, со степенью $n \leq 5$, аппроксимирующих функцию $g(t)$, формула Q_3 точна для всех многочленов при $n \leq 7$. Следует заметить, что при вычислении по формулам Q_1 и Q_2 частично используются одни и те же значения переменных интегрирования t , что заметно снижает вычислительные затраты.

Алгоритм численного интегрирования представляет собой итерационный процесс, в котором последовательно

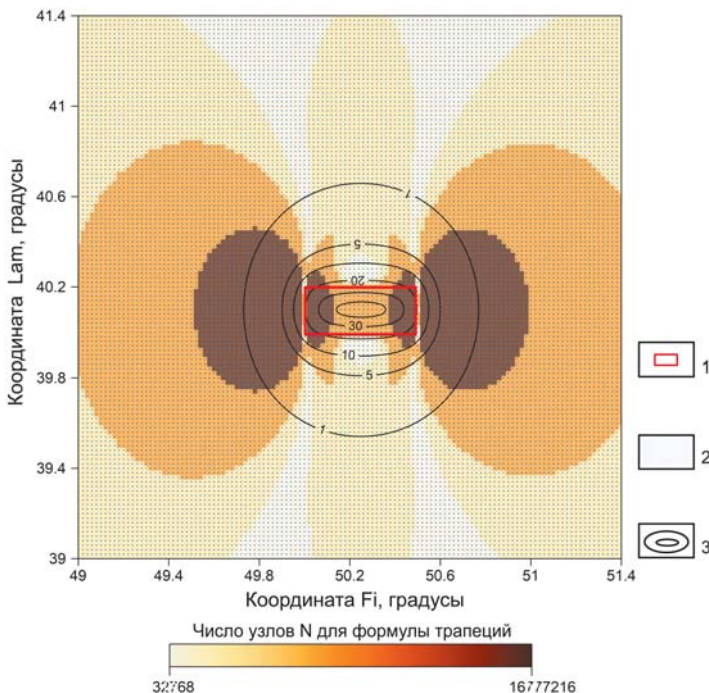


Рис. 4. Модельный пример: 1 – сферический параллелепипед; 2 – точки расчета гравитационного поля; 3 – изоаномалы V_R , мГал.

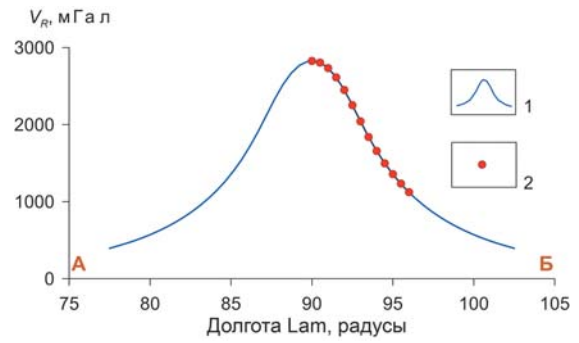


Рис. 5. Сопоставление результатов решения прямой задачи разными методами по широтному профилю АБ: 1 – адаптивный кубатурный алгоритм; 2 – квадратуры Гаусса-Лежандра (Старостенко, Манукян, 1983).

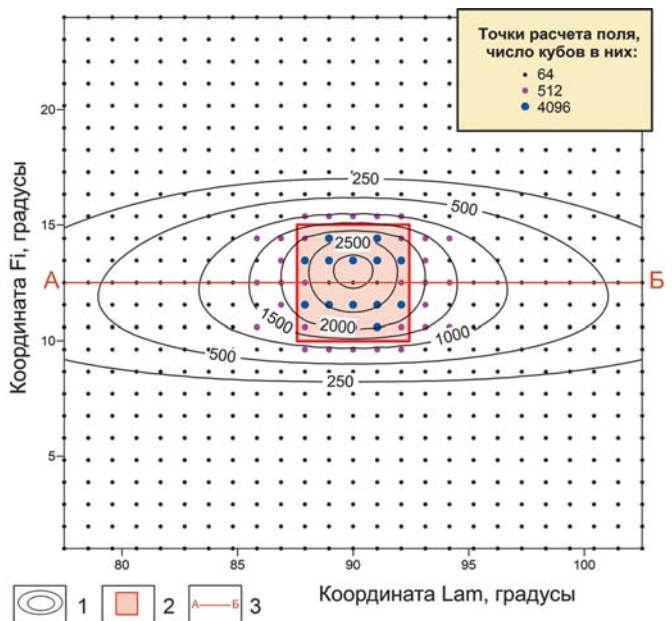


Рис. 6. Решение прямой задачи гравиметрии для сферического параллелепипеда с помощью адаптивного кубатурного алгоритма: 1 – изоаномалы V_R , мГал; 2 – аномалиеобразующий объект; 3 – расчетный профиль $\varphi_0 = 12.5^\circ$.

| Алгоритм расчета | Среднее N | Среднее ε , мГал | Время счета, с |
|-------------------------|----------------|---------------------------------|-------------------|
| Формула трапеций | 1065584 | 0.00008 | 694 |
| Формула парабол | 37764 | 0.00002 | 19 |
| Кубатурный алгоритм (3) | 2342 | 0.00002 | 7 |

Табл. 2. Параметры точности и скорости вычислений V_R

увеличивается число подобластей, на которые разбивается область G . Первоначально для этой области осуществляется вычисление интегралов по формулам $Q_1(g)$ и $Q_2(g)$. При выполнении условия:

$$\left| \frac{2[Q_1(g) - Q_2(g)]}{Q_1(g) + Q_2(g)} \right| \leq 10^{-4} \quad (4)$$

за приближенное значение интеграла принимается величина, вычисленная по формуле Q_3 , являющаяся линейной комбинацией значений, полученных по формулам Q_1 и Q_2 . Если условие (4) не выполняется, то G разбивается на 2^3 конгруэнтных кубов и данный алгоритм применяется к каждому из этих кубов. Процесс деления продолжается до тех пор, пока условие (4) не будет выполнено. С целью экономии времени желательно начинать вычисление тройного интеграла (2) с разбиения области G сразу на 64 куба. Результаты выполненных вычислительных экспериментов свидетельствуют, что число кубов при вычислении гравитационного эффекта от любого СП может быть ограничено сверху величиной $64^3 = 262144$.

В таблице 2 приведены результаты модельного эксперимента: вычисление V_R для объекта, ограниченного координатами $50^\circ \leq \varphi \leq 50.5^\circ$, $40^\circ \leq \lambda \leq 40.2^\circ$ и глубинами оснований 5 км и 15 км, обладающего избыточной плотностью 0.2 г/см^3 , на сферической Земле в 14641 точке квадратной сети размером $0.02^\circ \times 0.02^\circ$ (в линейной мере $\sim 1.4 \text{ км} \times 2.2 \text{ км}$). Отметим, что максимальная амплитуда поля V_R составляет примерно 36.4 мГал. Для расчета применялись составные формулы трапеций, парабол (Симпсона) и представленный выше алгоритм. Для методов Ньютона-Котеса использовался переменный шаг интегрирования k , последовательно уменьшающийся в 2 раза. Существенно ускорить процесс вычислений позволило однократное вычисление массива $\{ \cos \omega - \text{гравитационная постоянная} \}$ для аномалиеобразующего объекта и хранение его в RAM. Число узлов интегрирования N изменялось в зависимости от модуля разности интегралов $\varepsilon = |I(k) - I(k/2)|$ в каждой точке расчета поля (R , φ , λ) и составляло $2^{15} - 2^{24}$. Максимальное количество N вычисляемых значений функции $g(t)$ в предлагаемом алгоритме не превышало 33×2^9 .

Как очевидно, в данном случае наилучшие результаты получены с применением предлагаемого кубатурного алгоритма, а наиболее трудоемким во всех случаях является вычисление гравитационного эффекта вблизи возмущающего объекта (Рис. 4). Следует добавить, что реальная точность вычислений ε параметра V_R по итоговой формуле Q_3 будет несколько выше, чем указано в таблице, где использованы оценки $\varepsilon = |Q_1 - Q_2|$.

Представляет интерес сопоставление вышеописанного алгоритма вычислений поля СП с вычислительной схемой, приведенной в работе (Старостенко, Манукян, 1983), где имеются представленные в табличной форме результаты расчетов. Задача 4 представляет собой вычисление V_R для СП, расположенного по широте φ в интервале

$87.5^\circ - 92.5^\circ$, по долготе – в интервале $10^\circ - 15^\circ$, с глубиной верхней кромки 30 км от земной поверхности, с вертикальной мощностью 300 км, обладающего избыточной плотностью $\sigma = 1 \text{ г/см}^3$. Значения гравитационного поля, вычисленного двумя разными способами при одинаковой заданной точности $\varepsilon = 0.05$ мГал, по широтному профилю $\varphi_0 = 12.5^\circ$ близки между собой (Рис. 5).

Основные затраты времени при численном интегрировании зависят от скорости вычисления значений подынтегральной функции. Для расчета по формуле (3) число кубов, на которые разбивалась область интегрирования G , изменялось от 64 до 4096 (по 33 значения $g(t)$ в каждом из них). В одной точке определения V_R функция $g(t)$ в среднем вычислялась 3032 раза. Расчет гравитационного поля в $25 \times 25 = 625$ точках был выполнен за 1 секунду (Рис. 6).

При вычислении двойного интеграла с помощью квадратур Гаусса-Лежандра при той же точности интегрирования ε требовалось уже $32 \times 32 \times 16 = 16384$ значения функции (более сложной, чем $g(t)$).

Представленные результаты исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Повышение точности количественной интерпретации материалов гравиметрических съемок в пределах площадей (профилей) с линейными размерами (длиной) в первые сотни км может обеспечить учет сферичности Земли.

2. Решение прямых и обратных задач гравиразведки в сферической системе координат $\Sigma r\varphi\lambda$ вполне обеспечивается вычислительными возможностями современных компьютеров.

3. Адаптивный кубатурный алгоритм вычисления V_R для СП и реализующее его программное обеспечение могут эффективно использоваться при решении многих практических задач гравиразведки, в т.ч. при редуцировании результатов полевых измерений (Featherstone, Dentith, 1997) и для расчета поправок за влияние рельефа местности на сферической Земле.

Авторы статьи выражают глубокую благодарность доктору физико-математических наук П.И. Балку за ценные замечания, высказанные при подготовке статьи.

Работа выполнена при поддержке проекта ОНЗ РАН № 15-18-5-23.

Литература

- Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М: Наука. 2000. 622 с.
- Булах Е. Г. Прямые и обратные задачи гравиметрии и магнитометрии. Киев: Наукова думка. 2010. 463 с.
- Бычков С.Г., Долгаль А.С., Симанов А.А. Вычисление аномалий силы тяжести при высокоточных гравиметрических съемках. Пермь, УрО РАН. 2015. 142 с.
- Глазнев В.Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. Апатиты: «КаЭМ». 2003. 252 с.
- Долгаль А.С., Симанов А.А., Хохлова В.В. Алгоритмы приближенного решения прямой задачи гравиметрии на сферической Земле. *Мат. Межд. научно-практ. конф. «Теория и практика разведочной и промысловой геофизики»*. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т. 2014. С. 96-101.
- Пятаков Ю.В., Исаев В.И. Методы решения прямых задач гравиметрии. *Известия Томского политехнического университета*. 2012. № 1. Т. 320. С. 105-110.
- Сеначин В.Н., Лютая Л.М., Сеначин М.В. Некоторые вопросы гравитационного моделирования на сферической поверхности Земли. *Вестник ДВО РАН*. 2015. № 2. С. 43-48.

Старостенко В.И., Манукян А.Г. Решение прямой задачи гравиметрии на шарообразной Земле. *Физика Земли*. 1983. № 12. С. 34-50.

Страхов В.Н. О проблеме решения прямых задач гравиметрии и магнитометрии для материально стержня с полиномиальной плотностью. *Геофизический журнал*. 1985. Т. 7. № 5. С. 3-9.

Страхов В.Н. Разрешение господствующего стереотипа мышления – главная задача в развитии теории и практики интерпретации потенциальных полей (гравитационных и магнитных аномалий) в начале XXI века. М: ОИФЗ РАН. 2000. 44 с.

Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. М: Физматгиз. 1963. 656 с.

Featherstone W.E., Dentith M.C. 1997. A Geodetic Approach to Gravity Reduction for Geophysics. *Computers and Geosciences*. 1997. 23 (10). Pp. 1063-1070.

Jonson L.R., Litehiser J.A. A method for computing the gravitational attraction of three-dimensional bodies in a spherical or ellipsoidal Earth. *J. Geophys. Res.* 1972. V. 77. 35. Pp. 6999-7009.

Сведения об авторах

Александр Сергеевич Долгаль – главный научный сотрудник лаборатории геопотенциальных полей Горного института УрО РАН, доктор физ.-мат. наук.

Алексей Аркадьевич Симанов – научный сотрудник лаборатории геопотенциальных полей Горного института УрО РАН, канд. тех. наук.

Валерия Васильевна Хохлова – инженер лаборатории геопотенциальных полей Горного института УрО РАН, аспирант.

Горный институт УрО РАН

614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А

Тел: (342) 216-10-08, e-mail: dolgals@mi-perm.ru

Allowance for the Earth's Sphericity in Quantitative Interpretation of Gravity Anomalies

A.S. Dolgal', A.A. Simanov, V.V. Khokhlova

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

e-mail: dolgals@mi-perm.ru

Abstract. The paper deals with influence of the Earth's sphericity in simulation of geo-density irregularities by measuring gravitational field within relatively small areas (profiles). Model examples are given indicating significant difference between anomalous effects on "flat" and "spherical" Earth determined by the same disturbing objects. These differences create subvertical mass motion at geometrization of model associated with the change in shape of the Earth's surface. The size of the area is 200×200 km, profile length – 300 km. A new adaptive cubature algorithm is suggested for calculation of gravity acceleration V_R for a spherical rectangular block. It is compared with known algorithm using quadrature formulas of Gauss-Legendre and other methods of numerical integration. The new algorithm can be used in the future to solve many practical problems of gravity survey, including for calculation of allowances for terrain on a spherical Earth.

Keywords: gravity survey, anomaly, spherical Earth, interpretation, model, spherical rectangular block, numerical integration.

References

Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobel'kov G.M. Chislennye metody [Numerical methods]. Moscow: Nauka Publ. 2000. 622 p. (In Russian)

Bulakh E.G. Pryamyie i obratnye zadachi gravimetrii i magnetometrii [Direct and inverse problems of gravity and magnetometry]. Kiev: Naukova dumka. 2010. 463 p. (In Russian)

Bychkov S.G., Dolgal' A.S., Simanov A.A. Vychislenie anomalii sily tyazhesti pri vysokotochnykh gravimetricheskikh s'emkakh [The calculation of gravity anomalies in the precision gravity surveys]. Perm, UrO RAN. 2015. 142 p. (In Russian)

Dolgal' A.S., Simanov A.A., Khokhlova V.V. Algorithms of approximate solution of gravity direct problem on a spherical Earth. *Mat. Mezhd. nauch.-prakt. konf. «Teoriya i praktika razvedochnoy i promyslovoy geofiziki»* [Proc. Int. sci.-pract. conf. «Theory and practice of exploration and well logging geophysics»]. Perm: Perm. Gos. Nats. Issled. Un-t. 2014. Pp. 96-101. (In Russian)

Fikhtengol'ts G.M. Course of differential and integral calculation. Moscow: Fizmatgiz. 1963. 656 p. (In Russian)

Featherstone W.E., Dentith M.C. 1997. A Geodetic Approach to Gravity Reduction for Geophysics. *Computers and Geosciences*. 1997. 23 (10). Pp. 1063-1070.

Glaznev V.N. Kompleksnyie geofizicheskie modeli litosfery Fennoskandii [Integrated geophysical models of the lithosphere of Fennoscandia]. Apatity: KaeM Publ. 2003. 252 p. (In Russian)

Jonson L.R., Litehiser J.A. A method for computing the gravitational attraction of three-dimensional bodies in a spherical or ellipsoidal Earth. *J. Geophys. Res.* 1972. V. 77. 35. Pp. 6999-7009.

Pyatakov Yu.V., Isaev V.I. Methods of solving direct gravimetric problems. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]. 2012. № 1. T. 320. Pp. 105-110. (In Russian)

Senachin V.N., Lyutaya L.M., Senachin M.V. Some questions of gravity modeling on the spherical surface of the Earth. *Vestnik DVO RAN* [Bulletin FEB RAS]. 2015. № 2. Pp. 43-48. (In Russian)

Starostenko V.I., Manukyan A.G. The solution of the direct gravity problem of the spherical Earth. *Fizika Zemli* [Physics of the Earth]. 1983. № 12. Pp. 34-50. (In Russian)

Strakhov V.N. On the problem of solving direct problems of gravity and magnetometry for the material rod with polynomial density. *Geofizicheskii zhurnal* [Geophysical Journal]. 1985. Т. 7. № 5. Pp. 3-9. (In Russian)

Strakhov V.N. Resolution of the dominant patterns of thinking – the main task in the development of the theory and practice of potential fields interpretation (gravity and magnetic anomalies) at the beginning of the XXI century. Moscow: OIFZ RAN. 2000. 44 p. (In Russian)

Information about authors

Aleksandr S. Dolgal' – Chief Researcher of the Laboratory of Geopotential Fields, Doctor of Science (Phys. and Math.).

Aleksey A. Simanov – Researcher of the Laboratory of Geopotential Fields, PhD (Tech.).

Valeriya V. Khokhlova – Engineer of the Laboratory of Geopotential Fields, PhD student.

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

614007, Russia, Perm, Sibirskaya St., 78-А

Phone: +7(342) 216-10-08