

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.312

К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ МАСС ВОЗМУЩАЮЩЕГО ТЕЛА И ЕГО ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ ПО ВЕРТИКАЛЬНОМУ ГРАДИЕНТУ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Чан Ван Ньяк*)

(ГАНШ)

Предлагается метод оценки глубины залегания и величины залегающей массы по значениям аномалий и вертикального градиента силы тяжести. Вводится функция, зависящая от расстояния до возмущающей массы, и проводится оценка ее величины и глубины залегания.

Предлагаемый метод крайне прост. Известно, что аномалия силы тяжести убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от притягивающего тела:

$$\Delta g = GM/r^2, \quad (1)$$

(G — гравитационная постоянная, M — масса, вызывающая аномалию, r — расстояние от точки наблюдения на поверхности Земли до аномальной массы), тогда как аномалия ее градиента убывает существенно быстрее — обратно пропорционально третьей степени расстояния:

$$\Gamma = 2GM/r^3. \quad (2)$$

Поэтому уже на сравнительно близком расстоянии по картине распределения градиентов невозможно определить наличие аномальных масс. Но если имеется информация и об аномалиях, и о градиентах силы тяжести, то тогда можно получить функцию, пропорциональную первой степени расстояния:

$$\Gamma/\Delta g = 2/r = K. \quad (3)$$

Слабая чувствительность функции K к изменению расстояния до аномальных масс позволяет использовать ее в качестве индикатора наличия больших удаленных масс. Итак, если градиент силы тяжести отображает поверхностные массы, в первую очередь рельеф, то функция K указывает на наличие больших масс глубинного — подкорового или мантийного — залегания.

Пусть мы имеем карту аномалий силы тяжести Δg и карту распределения вертикальных градиентов ее Γ . Выделим области совпадающих максимумов тех и других (рис. 1). Можно с уверенностью сказать, что если имеется такой двойной максимум, то под этой областью сосредоточен какой-то избыток массы, вызывающий его.

В случае острого максимума вертикального градиента при отсутствии или очень слабом максимуме аномалии Δg (рис. 1, а) можно утверждать, что возмущающее тело в этом месте имеет малую избыточную массу и лежит где-то близко к поверхности.

*) Вьетнам.

Если возмущающее тело имеет большую массу, но залегает очень глубоко, то его влияние хорошо проявляется максимумом Δg , но может почти не чувствоваться в градиенте силы тяжести (рис. 1, б).

Наконец, если возмущающее тело очень велико и лежит на умеренной глубине, оно достаточно четко ощущается и аномалиями Δg и

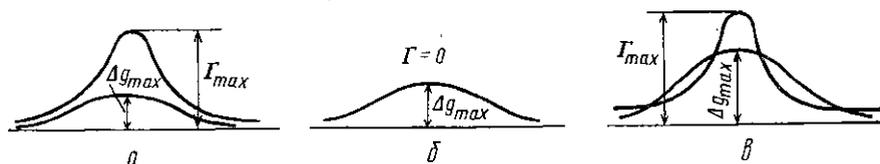


Рис. 1. Ход кривых Δg и Γ над возмущающей массой

градиентом Γ (рис. 1, в). В этом случае можно оценить глубину залегания возмущающего тела, пользуясь соотношением (3):

$$r=2/K=2\Delta g/\Gamma.$$

Конечно, этот метод схематичен. Весь ход рассуждений, строго говоря, относится к точечным массам или однородным шаровым. Но такая схематизация практически всегда неизбежна и, как правило, всегда применяется при геолого-геофизической интерпретации. Решение таких задач неоднозначно и, как во всех некорректно поставленных задачах, требует дополнительных данных.

Чтобы оценить глубину залегания массы, вызывающей значительные аномалии силы тяжести, нужно знать характер общего гравитационного поля и распределение вертикального градиента. Для расчета эти характеристики удобно иметь в виде карт.

Первое не представляет проблемы. Возьмем любую из последних карт аномалий силы тяжести Δg , построенных по данным ИСЗ, например карту, соответствующую модели GEM-10 [1] (рис. 2), или GRIM-3, или, наконец, GEM-T1.

Сложнее обстоит дело с картами аномалий вертикального градиента: таковых просто нет. Поэтому нам приходится строить такую карту заново.

Приведем здесь схему решения этой задачи и основные результаты уже в виде карты.

Полная величина вертикального градиента по направлению отвесной линии определяется выражением

$$\Gamma = \left| \frac{\partial g}{\partial n} \right| = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial \rho} \right)^2 + \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{\partial g}{\partial \varphi} \right)^2 + \frac{1}{\rho^2 \cos^2 \varphi} \left(\frac{\partial g}{\partial \lambda} \right)^2}, \quad (4)$$

где ρ — радиус-вектор, \mathbf{n} — нормаль, φ — широта, λ — долгота, g — ускорение силы тяжести, представленное разложением по сферическим функциям для любой точки пространства:

$$g = \frac{GM}{\rho^2} \left\{ g_{00}(\rho) + \sum_{n=2}^N \sum_{m=0}^n (g_{nm}(\rho) \cos m\lambda + h_{nm}(\rho) \sin m\lambda) \right\} P_{nm}(\sin \varphi), \quad (5)$$

P_{nm} — сферическая функция. Коэффициенты g_{nm} , h_{nm} зависят от стоксовых коэффициентов C_{nm} , S_{nm} и представлены в виде функций от геоцентрического расстояния точки наблюдения ρ .

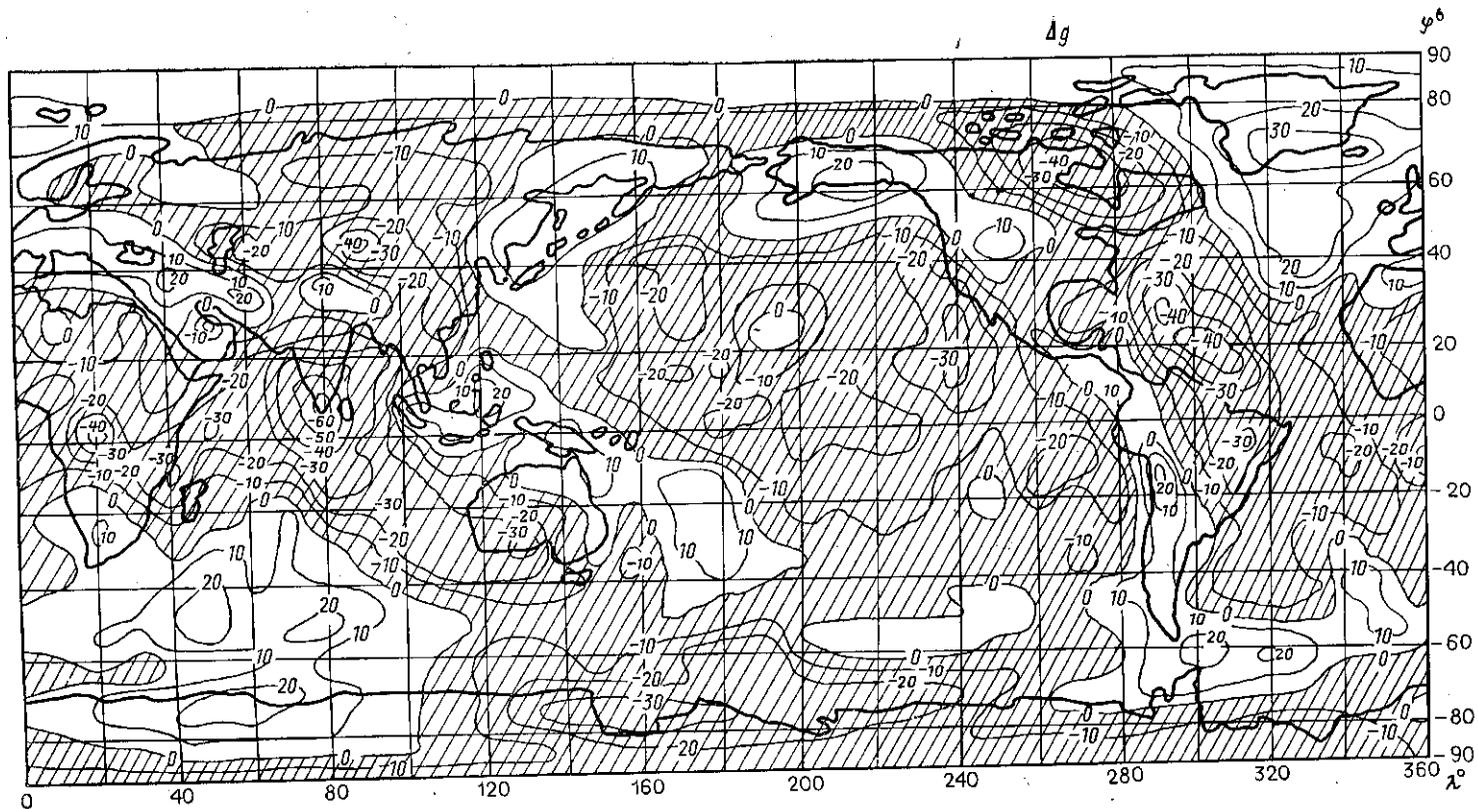


Рис. 2. Аномалии силы тяжести по разложению до 30-го порядка и степени. За основу принята модель GEM-10. Изолинии проведены через 10 мГал

Частные производные по ρ , φ , λ имеют вид

$$\frac{\partial g}{\partial \rho} = GM \frac{\partial}{\partial \rho} \left\{ \frac{g_{00}(\rho)}{\rho^2} + \sum_{n=2}^N \sum_{m=0}^n \left[\frac{g_{nm}(\rho)}{\rho^2} \cos m\lambda + \frac{h_{nm}(\rho)}{\rho^2} \sin m\lambda \right] P_{nm}(\sin \varphi) \right\}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial g}{\partial \varphi} = \frac{GM}{\rho^2} \left\{ \sum_{n=2}^N \sum_{m=0}^n [g_{nm}(\rho) \cos m\lambda + h_{nm}(\rho) \sin m\lambda] \times \right. \\ \left. \times [-m \operatorname{tg} \varphi P_{nm} + \mu P_{nm}(\sin \varphi)] \right\}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial g}{\partial \lambda} = \frac{GM}{\rho^2} \left\{ \sum_{n=2}^N \sum_{m=0}^n m [-g_{nm}(\rho) \sin m\lambda + h_{nm}(\rho) \cos m\lambda] P_{nm} \right\}. \quad (8)$$

Так как нас интересует точка наблюдения на поверхности геоида или по крайней мере на поверхности сглаженного геоида, то подставим в эти уравнения значения ρ в виде разложения по сферическим функциям до N -го порядка:

$$\rho(\varphi, \lambda) = R_0 \left[1 + A_{00} + \sum_{n=2}^N \sum_{m=0}^n (A_{nm} \cos m\lambda + B_{nm} \sin m\lambda) P_{nm} \right], \quad (9)$$

где A_{nm} , B_{nm} — коэффициенты, зависящие от стоксовых постоянных и выбранной модели Земли. Их вывод сделан на основе уравнения геоида

$$W(\rho, \varphi, \lambda) = W_0, \quad (10)$$

где W — потенциал силы тяжести Земли, представленный в виде разложения по сферическим функциям до того же порядка и степени, W_0 — постоянная геоида, полученная по 13 станциям наблюдения ИСЗ.

Средняя величина W_0 для всех станций получилась равной

$$W_0 = 62637,23 \cdot 10^3 \pm 0,08 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{с}^2. \quad (11)$$

Пусть $R_0 = GM/W_0$, тогда $W_0 = GM/R_0$. Подставляя (5)–(7) в (4), получаем значение Γ .

В качестве исходной модели Земли мы воспользовались моделью GEM-10 и использовали стоксовы коэффициенты этой модели.

Был проведен расчет значений градиента силы тяжести на поверхности геоида, полученного по разложению до 30-го порядка и степени, для всего мира по трапециям $5^\circ \times 10^\circ$ по широте и долготе соответственно [2]. Составлена таблица, на основании которой построена карта (рис. 3).

Для расчета аномалий вертикального градиента силы тяжести за нормальное поле градиента принято

$$\Gamma_0 = \left| \frac{\partial g}{\partial n} \right|_0 = 0,3086 (0,9998542 + 0,00071 \cos 2\varphi). \quad (12)$$

Максимальная величина аномалий градиента составляет $8 \cdot 10^{-2}$ мГал/км, т. е. $8 \cdot 10^{-1}$ этвеш. Для простоты чтения карта по-

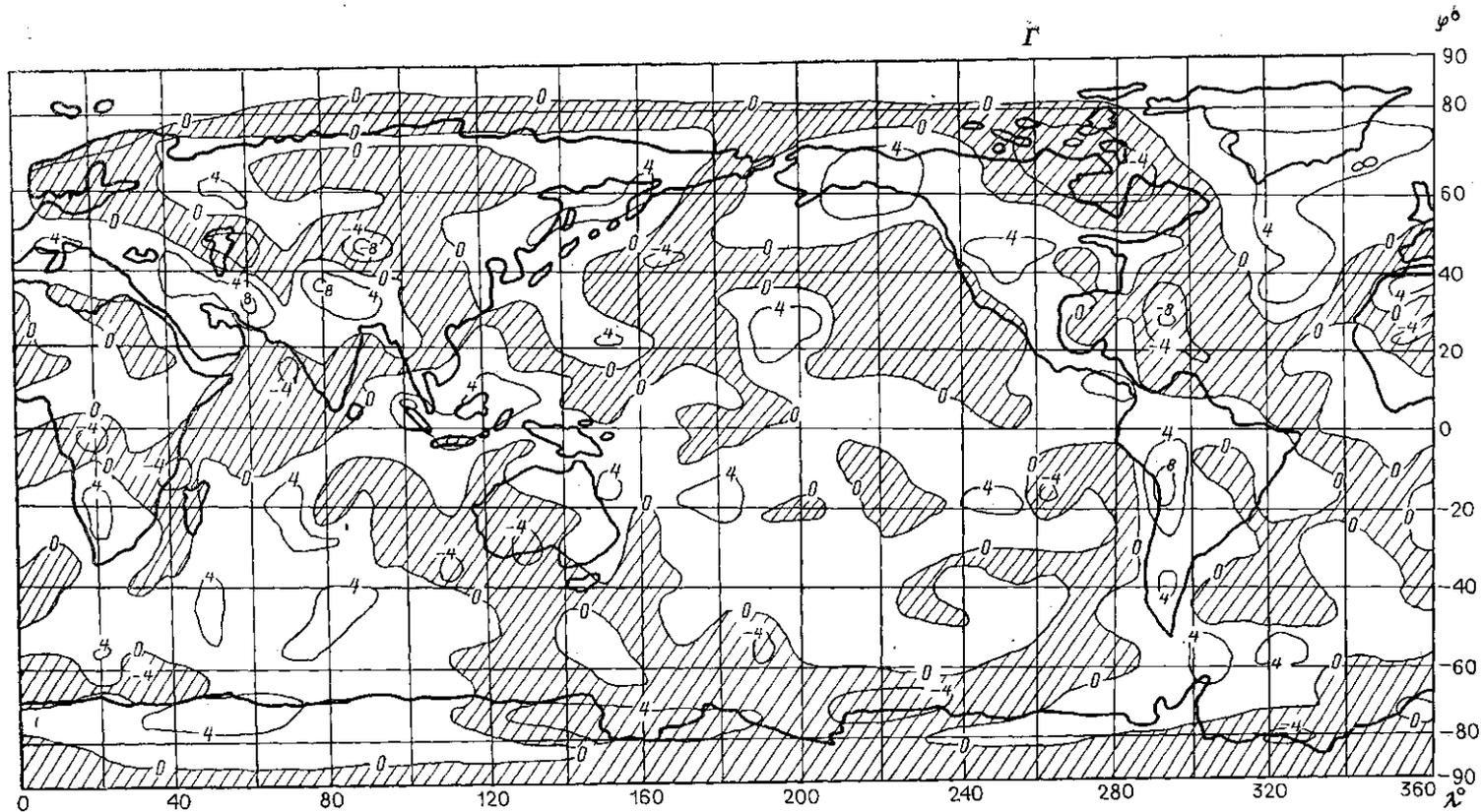


Рис. 3. Распределение вертикального градиента силы тяжести по разложению до 30-го порядка и степени на поверхности геоида 30-го порядка в единицах 10^{-2} мГал/км (или 10^{-1} этвеш)

строена в десятых долях этвеша и изолинии проведены через 4 единицы.

Рассмотрим и сопоставим две приведенные карты: аномалий Δg (см. рис. 2) и аномалий градиента Γ (см. рис. 3). Наличие максимумов или минимумов аномалий соответствует, очевидно, избытку или недостатку масс, причем преобладание интенсивности аномалии Δg над величиной Γ свидетельствует о глубоком залегании масс и, наоборот, преобладание аномалий Γ — о залегании, близком к поверхности. То же относится к отрицательным аномалиям, соответствующим залеганиям отрицательных масс. Например, аномалии порядка $+10$ имеют место в области массива Гималаев, в Боливии, над Иранским плоскогорьем.

Этим максимумам вертикального градиента соответствуют и максимумы аномалии Δg порядка $+20$ — $+40$ МГал, что свидетельствует о наличии в этих областях избыточных масс, расположенных на небольших глубинах.

В области Карибского моря и на северном Тибете имеют место отрицательные аномалии Γ (порядка -8). Там же наблюдается минимум аномалий Δg , достигающий -40 мГал. Следовательно, в этих областях на небольших глубинах имеется разуплотнение.

Известная большая отрицательная аномалия Δg , охватывающая Шри Ланку и юг Индии, не находит отражения в аномалиях градиента. Это значит, что избыточные массы, вызывающие эту аномалию, лежат на большой глубине.

В таблице приводятся наблюдаемые региональные аномалии Γ и Δg и рассчитанные по формулам (1)—(3) глубина залегания и общая масса, эти аномалии вызывающая.

Область мира	Аномалия силы тяжести Δg , мГал	Вертикальный градиент Γ ($\times 10^{-2}$ мГал/км)	Глубина залегания, км	Масса M ($\times 10^{13}$ Т)
Иран	+20	+10	400	0,48
Юг Австралии	-35	-5	1400	10,2
Боливия	+37	+11	672	2,5
Гималаи	+14	+10	280	1,6
Карибское море	-45	-7	1250	11,1
Тибет	-42	-8	1050	6,9
Юг Америки	+25	+7	714	1,9
Антарктида	-36	-8	900	9,7
Африка	+47	-8	1175	2,3
Северная Атлантика	-37	-7	1057	10,4

Из таблицы видно, что большинство региональных гравитационных экстремумов связано с залеганием положительных или отрицательных масс на глубине порядка 1000 км, т. е. в области перехода от верхней к нижней мантии. Эти массы вызывают вполне ощутимые аномалии как Δg , так и Γ . Аномальные массы, залегающие на глубинах в 2000 км и больше, вызывают очень малые вертикальные градиенты силы тяжести (меньше (1—2) 10^{-2} мГал/км), но в то же время значительные аномалии Δg . Таковы региональные отрицательные аномалии на юге Индии и на острове Шри Ланка, по-видимому, отображающие массы очень глубокого залегания. Исключение составляет аномалия в области Гималаев и Иранского плоскогорья, под которыми возмущающие массы залегают где-то близко к границе кора—мантия.

Зная глубину залегания массы, легко определить ее величину по формуле (1). Из таблицы видно, что максимальные значения масс превышают 10^{14} Т в области юга Австралии, вблизи Карибского моря и на севере Атлантики.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Lerch F. J., Klosko S. M., Laubsher R. E., Wagner C. A. // Gravity model improvement using GEOS-3 (GEM-9, GEM-10). Goddard space flight center, 1977. [2] Грушинский Н. П., Сагитов М. У., Чан Ван Нян. // Сообщения ГАИШ. М., 1978. № 202—203. С. 49.

Поступила в редакцию
09.09.92

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1993. Т. 34, № 5

АСТРОНОМИЯ

УДК 521.1

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ СПУТНИКОВАЯ ЗАДАЧА С УЧЕТОМ ГАЛАКТИЧЕСКОГО ВРАЩЕНИЯ

А. А. Власов

(кафедра квантовой теории и физики высоких энергий)

Показано, что уравнения движения спутника в Солнечной системе с учетом галактического вращения последней позволяют в системе отсчета локального геоцентрического наблюдателя выявить эффекты, индуцированные галактическим вращением.

1. Практически все работы по динамике естественных и искусственных тел Солнечной системы не учитывают галактического вращения последней (см., напр., книги [1—4], статьи [5—7] и цитируемую в них литературу). По-видимому, это связано с широко распространившимся мнением, что движение Солнечной системы для анализа постньютоновских эффектов достаточно считать прямолинейно равномерным и, следовательно, в силу лоренц-ковариантности исходных уравнений не оказывающим влияния на наблюдаемую физику. Но такое толкование неудовлетворительно по двум причинам.

Во-первых, из-за путаницы в понятиях лоренц-ковариантности, лоренц-форминвариантности и постгалилеевской (асимптотической лоренцевой) инвариантности. Действительно, лоренц-ковариантность теории подразумевает, что все величины, с которыми имеет дело теория (исходные уравнения, полевые переменные и т. п.), преобразуются как тензоры при лоренц-преобразованиях специальной теории относительности. Лоренц-форминвариантность некоторого выражения означает, что форма данного выражения не меняется при преобразованиях Лоренца. Так, интервал пространства Минковского, метрика пространства Минковского и, например, уравнения Максвелла являются лоренц-форминвариантными (что в свое время и позволило обобщить ньютоновский принцип о ненаблюдаемости глобального равномерно прямолинейного движения). Однако уравнения как ОТО, так и РТГ являются форминвариантными только локально, но не глобально, будучи при этом общековариантными теориями. Поэтому как в ОТО, так и в РТГ при наличии гравитационного поля нельзя требовать полной идентичности формы физических законов в системах координат, связанных