

ны: *Holocryptocanium* sp., *Pantanellium berriasianum* Baum., *Ristola* cf. *boesii* (Parona), *Archaeodictyomitra apiara* (Rust), *Archaeodictyomitra* sp. Общая мощность кэпэтчакыльской толщи не менее 600 м. Возраст ее берриас — готерив.

Таким образом, вулканогенно-кремнисто-терригенные отложения междуречья Тальян — Правый Тальянын на основе радиолярий подразделены на толщи, выделены отдельные пачки терригенных пород, удовлетворяющие требованиям крупномасштабного картирования. Для этих отложений характерны многочисленные зоны дробления, сложная дислоцированность, что не позволяет, как отмечалось В. П. Зинкевичем [2], дешифрировать там тектонические структуры. Отчетливо выражены многочисленные разломы, по которым разновозрастные блоки приведены в контакт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бельй В. Ф. О тектоническом строении правобережья нижнего течения р. Анадырь (ларамиды Северо-Востока Азии) // Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР. Вып. 16. — Магадан, 1963. — С. 106—126.
2. Зинкевич В. П. Тектоника Ваежско-Алганской и Великореченско-Рарытгинской зон Корякского нагорья // Очерки тектоники Корякского нагорья. — М.: Наука, 1982. — С. 106—135.
3. Козлова Г. Э. Распространение радиолярий в баженовской свите Западной Сибири // Тр. ИГиГ СО АН СССР. — 1983. — № 528. — С. 47—55.
4. Baumgartner P., Bernoulli D. Stratigraphy and Radiolarian Fauna in a Late Jurassic — Early Cretaceous Section near Achladi (Ewoia, Eastern Greece) // *Eclage. geol. Helvetiae* (Basel). — 1979. — V. 69, N 3. — P. 601—626.
5. Foreman H. P. Radiolaria from the North Pacific. DSDP Leg. 32 // Initial Reports of the DSDP. — 1975. — V. 32. — P. 579—676.
6. Pessagno E., Whalen P. Lower and Middle Jurassic Radiolaria (multicyrtid Nassellariina) from California, eastcentral Oregon and the Queen Charlotta Islands, B. C. // *Micropaleontology*. — 1982. — V. 28, N 2. — P. 111—169.

Севвостгеолком
Магадан

Поступила в редакцию
7 июня 1993 г.

УДК 550.831

В. Ю. Косыгин, В. И. Исаев, Ю. В. Пятаков, Л. Д. Швец

МЕТОДИКА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ АНОМАЛЬНОГО ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЛОКОВО-ГРАДИЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ

На базе привлечения устойчивых методов квадратичного программирования разработана методика интерпретации аномального гравитационного поля (в линейной постановке), позволяющая восстанавливать по известному полю плотностную структуру тектоносферы в классе трехмерных блоково-градиентных моделей.

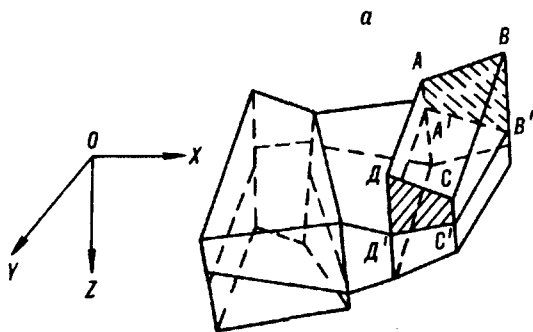
Изучение строения и развития тектоносферы Мирового океана имеет исключительно важное значение при решении кардинальных вопросов теоретической и прикладной геологии [12].

Поскольку основная часть исследуемых регионов представлена акваториями, что затрудняет и ограничивает непосредственное исследование верхней части осадочных толщ посредством глубоководного бурения, большая роль в таких исследованиях отводится методам гравиметрии.

Основные методологические положения использования данных гравиметрии были сформулированы в многочисленных исследованиях на эту тему, в том числе и авторами настоящей работы [2, 4, 10, 11, 14]. В подавляющем большинстве случаев эти построения проводились применительно к двумерным моделям с постоянными плотностями.

Рис. 1. Объемное моделирование блоково-градиентных сред.

a — описание геологической структуры аппроксимирующими блоками, *б* — аппроксимирующие блоки-призмы.



Необходимость привлечения трехмерных моделей вытекает из принципа адекватности и поэтому достаточно очевидна. Остановимся подробнее на использовании градиентных трехмерных моделей.

Термин «градиентные модели» неоднократно использовался различными авторами [13, 15] и означает отражение в моделях тенденции к изменению плотности пород в пределах геологических толщ.

На примере осадочных пород, рассматриваемых в монографии [9], эта тенденция, в частности, наиболее адекватно будет описываться экспоненциальными зависимостями [4, 6]:

$$\sigma(H) = B_0 - B_1 \cdot \exp(-B_2 H), \quad (1)$$

где H — глубина залегания пород; B_0, B_1, B_2 — параметры, определяемые составом осадочных пород и геологическими условиями их формирования.

Поскольку при априори известных диапазонах изменения глубин исследуемых объектов зависимость (1) достаточно удовлетворительно может аппроксимироваться линейными законами вида:

$$\sigma(H) = \sigma_0 + kH, \quad (2)$$

будем полагать, что плотности в слоях изменяются согласно (2).

Понятие «блоковые конструкции» и методология их построения достаточно хорошо описаны в работах [2, 9, 10], поэтому подробно останавливаться на этом вопросе не будем.

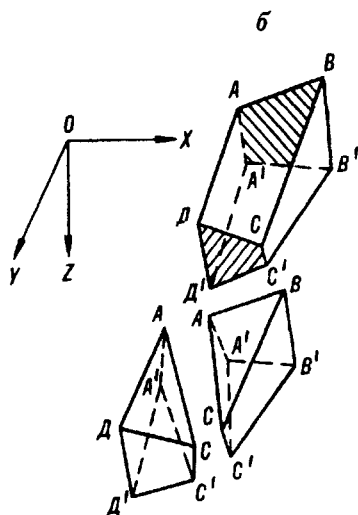
Итак, полагаем, что строение изучаемого геологического объекта отражено некоторой трехмерной блоковой конструкцией (частный фрагмент такой конструкции показан на рис. 1, *a*), а плотности в блоках изменяются согласно (2).

Тогда гравитационный эффект всего объекта определяется суммированием эффектов отдельных блоков:

$$V_z(x, y, z) = \sum_{j=1, N} (A_j' \sigma_0 + A_j'' k_j), \quad (3)$$

где N — количество блоков; σ_0, k_j — параметры плотности j -го блока; A_j', A_j'' — гравитационные эффекты j -го блока при σ_0 и k_j равных нулю и (или) единице соответственно.

Ввиду того, что вертикальные треугольные призмы (см. рис. 1, *б*) обладают хорошими аппроксимационными свойствами, будем полагать, что геологический объект представлен набором таких призм.



Гравитационный эффект отдельной j -й призмы:

$$V_{zj} = A_j' \sigma_{0j} + A_j'' k_j \quad (4)$$

выражается через элементарные аналитические функции в работе [13].

Параметры σ_{0j} и k_j при известном пространственном расположении блоков могут быть определены по внешнему гравитационному полю путем решения обратной линейной задачи гравиметрии [15]. Ввиду того, что внешняя обратная задача гравиметрии в общем случае является теоретически неоднозначной [12], считаем необходимым более подробно остановиться на этом вопросе.

К исследованиям такого рода побуждают не только частные практические вопросы (например, установления возможного необходимого минимума дополнительной геологической информации, обеспечивающего единственность решения обратной линейной задачи гравиметрии), но, как это будет показано далее, ряд важных следствий общеметодологического характера, которые могут существенно расширить область практического использования методов гравиметрии.

Итак, гравитационный эффект геоблока, аппроксимирующего геологическую среду (вертикальной треугольной призмы с плотностью (2)), определяется известным соотношением:

$$V_z(x, y, z) = f \int_{Q_j} (\sigma_{0j} + k_j Y) \frac{(Y - z)}{R^3} d\xi d\eta dY, \quad (5)$$

где Q_j — призма; $R = \sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (Y - z)^2}$.

Рассматривая вторые производные $V_z(x, y, z)$, в частности:

$$V_{zz}(x, y, z) = f \int_{Q_j} (\sigma_{0j} + k_j Y) \cdot \frac{\partial^2 (1/R)}{\partial z^2} d\xi d\eta dY, \quad (6)$$

заметим, что (6) можно представить в виде

$$V_{zz}(x, y, z) = (\sigma_{0j} + k_j z) \cdot \frac{\partial^2 \varphi(x, y, z)}{\partial z^2} + P(x, y, z), \quad (7)$$

где $P(x, y, z)$ — непрерывная функция; $\varphi(x, y, z)$ — гравитационный потенциал однородной призмы Q_j с постоянной единичной плотностью.

Далее, следуя схеме, предложенной в работе В. Н. Страхова [17] для однородных многогранников с постоянной плотностью, можно доказать единственность решения общей обратной задачи гравиметрии на основании исследования особенностей поведения вторых производных потенциала $\varphi(x, y, z)$ вблизи ребер призм [14]. То есть задачи определения по известному внешнему полю не только параметров плотностей σ_{0j} и k_j призм, но и геометрической формы и пространственного расположения как отдельных призм, так и их совокупности, или, иначе говоря, смешанной обратной задачи гравиметрии.

В практическом плане это означает, что при решении обратной задачи гравиметрии можно задаваться априорным геометрическим пространственным расположением аппроксимирующих призм, автоматически уточняя это расположение в процессе решения вместе с параметрами σ_{0j} и k_j .

В математическом плане задача формализуется системой линейных (при решении обратной линейной задачи гравиметрии) или нелинейных (при решении смешанной обратной задачи гравиметрии) уравнений [4]:

$$\sum_{j=1, N} (A_j' \sigma_{0j} + A_j'' k_j) + B_0 + B_1 x_i + B_2 y_i = V_{zi}, \quad j = 1, N; \quad i = 1, M; \\ B_0 + B_1 x_i + B_2 y_i = B, \quad (8)$$

где B — линейная функция, аппроксимирующая региональный фон; V_{zi} — наблюдаемое значение гравитационного поля в точке с координатами (x_i, y_i, z_i) .

Рис. 2. Модельный пример.

a — модель среды (три слоя, 22 аппроксимирующих блока); *b* — сеть наблюдений (49 точек, $z = -1$ м).

Следуя В. И. Старостенко [15], некорректную задачу (8) можно свести к задаче минимизации параметрического функционала А. Н. Тихонова:

$$f(x) = \|Ax - b\|^2 + 2\Omega(x), \quad (9)$$

где x — неизвестные задачи; b — наблюдаемое гравитационное поле; $\Omega(x)$ — регуляризирующий функционал, определенный таким образом, что множество $\bar{x} = \{x: \Omega(x) \leq C, C > 0\}$ — есть компакт в x [15].

Задача может быть решена методами нелинейного программирования, обобщенными на случай ограничений на неизвестные:

$$x^{(H)} \leq x \leq x^{(b)}. \quad (10)$$

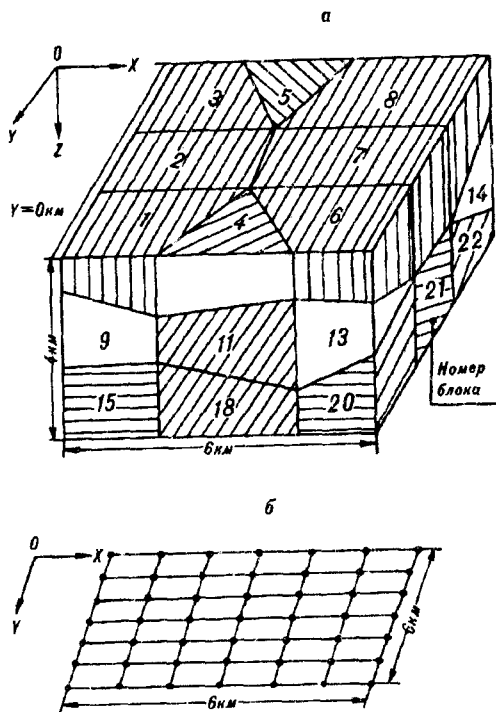
Необходимо отметить, что, как замечено в работах [5—8], использование в качестве регуляризирующего функционала $\Omega(x)$ квадрата нормы $\|x - x_0\|^2$, где x_0 — начальное приближение решения обратной задачи, может привести к отрицательным эффектам: проявлению свойств «гармоничности» решения на конструкциях блочного типа. Не рассматривая примеров положительных результатов, полученных в работе [1] и основанных на исследовании зависимости свойств решения обратной задачи от геометрических размеров блоков, заметим, что избежать вышеуказанных нежелательных эффектов можно также и путем варьирования вида регуляризирующего функционала $\Omega(x)$ (в частности, проектируя критерии [8] на блочные конструкции). Это не противоречит условиям задачи (9) и не приводит к существенным изменениям программных модулей решения обратных задач, использующих функционалы вида $\Omega(x) = \|x - x_0\|^2$. Примеры и указание на необходимость исследования свойств решений от вида стабилизирующего функционала приводились в работе В. И. Старостенко [16].

В качестве иллюстрации к изложенным выше положениям методологического плана приведем пример их практического использования, полученный с помощью программного комплекса, разработанного в ЦГИИ ГП «Восток-геология» [4].

Модель, представленная на рис. 2, является трудной с точки зрения глубинной разрешимости. «База» наблюдений может быть недостаточной для восстановления плотности на гл. лнах 4 км.

Из полученных результатов (см. таблицу) следует: при «перемещении» блока к поверхности ошибка восстановления плотности, как правило, уменьшается; в целом, плотность на «кровле» блока восстанавливается с меньшей ошибкой, чем на «подошве», с уменьшением уровня помехи в наблюдаемом поле ошибка восстановления плотности закономерно уменьшается. Все это свидетельствует об устойчивости решения задачи.

В заключение отметим, что полученные в работе положительные результаты позволяют получать новые данные о строении и эволюции тектоносферы Тихого океана на основе использования методов трехмерного блочно-градиентного моделирования.



К решению обратной задачи на тестовой модели (ошибки восстановления плотности среды, $\times 10^{-2}$ г/см³)

Но- мер слоя	Номер блока	Поле точное		Помеха $\pm 0,10$ мГл		Помеха $\pm 0,50$ мГл	
		«Кровля»	«Подошва»	«Кровля»	«Подошва»	«Кровля»	«Подошва»
1	1	0(0)	0	+1(0)	-1	0(-1)	-2
	2	0(0)	0	-2(-1)	+1	-13(-5)	+15
	3	0(0)	0	-2(0)	+5	-3(0)	+3
	4	0(0)	0	+2(+1)	-1	0(+1)	-14
	5	0(0)	0	-3(-1)	+6	-11(-3)	+16
	6	0(0)	0	+1(-1)	-2	+6(-4)	-16
	7	0(0)	0	+2(0)	-4	+4(0)	-10
	8	0(0)	0	-3(0)	+8	-6(0)	+16
	С. К. О.	0,0(0,0)	0,0	2,1(0,7)	4,3	7,0(2,6)	12,6
С. К. О.		0,0(0,0)		3,4(0,7)		10,2(2,6)	
2	9	0(0)	-2	-8(-7)	-10	-11(-13)	-13
	10	0(0)	0	-11(-13)	-11	-23(-17)	-13
	11	+2(0)	-7	-8(-9)	-10	-10(-18)	-14
	12	(0)	0	-9(-8)	-9	0(-1)	0
	13	+2(0)	-6	+1(+3)	-5	-20*(+20*)	-10
	14	0(0)	0	11(-9)	-11	+16(-8)	+16
	С. К. О.	1,210	3,8	8,7(8,7)	9,6	15,3(14,4)	14,4
	С. К. О.		2,8(0,0)		9,2(8,7)		14,9(14,4)
	С. К. О.						
3	15	0(0)	0	+7(+5)	+5	+4(+4)	+3
	16	0(0)	0	0(+3)	+2	+15(+25*)	+12
	17	+1(0)	-1	+0(+3)	+2	+3(-1)	0
	18	+1(0)	+9	+4(+3)	+11	0(-3)	+10
	19	0(0)	0	+3(+7)	+4	+6(+14)	+6
	20	+ (0)	+3	+4(+2)	+7	0(+4)	+14
	21	-1(0)	-1	-3(-5)	-1	-5(-13*)	0
	22	+ (0)	0	+5(+8)	+3	+7(+13)	+2
	С. К. О.	0,8(0,0)	3,4	4,0(4,2)	5,3	6,7(12,2)	7,8
	С. К. О.		2,5(0,0)		4,7(4,2)		7,3(12,2)
С. К. О.	0,8(0,0)	2,9	5,3(5,4)	6,5	9,8(10,7)	11,6	
С. К. О.	2,1(0,0)		5,9(5,4)			10,7(10,7)	
		100 итера- ций		23 итерации			25 итераций

Пр и м е ч а н и е. В скобках приведены ошибки решения задачи при постоянной плотности блоков. Звездочкой помечены решения на ограничениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексидзе М. А. Приближенные методы решения прямых и обратных задач гравиметрии.— М.: Наука, 1987.
2. Исаев В. И. Интерпретация гравитационного поля методом нелинейного программирования // Тихоокеан. геология.— 1986.— № 6.— С. 63—69.
3. Исаев В. И., Пятаков Ю. В. Решение прямой задачи гравиметрии для трехмерных блоково-градиентно-слоистых сред // Геофизический журн.— 1990.— Т. 12, № 3.— С. 72—79.
4. Исаев В. И., Пятаков Ю. В. и др. Объемное моделирование в гравитационном поле плотности сейсмического тела // Интерпретация гравитационных и магнитных полей.— Киев: Наук. думка.— С. 145—155.
5. Кобрунов А. И. О некоторых особенностях методов подбора в геофизических задачах // Докл. АН УССР, Б.— 1981.— № 4.— С. 10—13.
6. Кобрунов А. И. К теории методов подбора // Геофизический журн.— 1983.— Т. 5, № 5.— С. 34—43.
7. Кобрунов А. И. Оценки эквивалентности в методах подбора // Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений.— Вып. 30.— Львов, 1983.— С. 51—54.
8. Кобрунов А. И. Теория интерпретации данных гравиметрии для сложностроенных сред.— Киев: УМКВО, 1989.
9. Косыгин В. Ю. Гравитационное поле и плотностные модели тектоносферы северо-запада Тихого океана.— Владивосток, 1991.
10. Косыгин В. Ю., Исаев В. И. О построении региональных плотностных моделей // Тихоокеан. геология.— 1985.— № 2.— С. 113—116.

11. Косыгин Ю. А. Тектоника. — М.: Недра, 1984.
12. Новиков П. С. Об единственности решения обратной задачи потенциала // Докл. АН СССР. — 1938. — Т. 18, № 3. — С. 165—168.
13. Пятаков Ю. В. Решение прямой задачи гравиметрии для неоднородных сред // Геофизический журн. — 1991. — Т. 13, № 5. — С. 79—85.
14. Пятаков Ю. В. Решение прямых и обратных задач гравиметрии для объемных блоково-градиентно-слоистых сред: Автореф. канд. дис. — Киев: Институт геофизики, 1992.
15. Старостенко В. И. Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии. — Киев: Наук. думка, 1978.
16. Старостенко В. И., Заворотько А. Н. Решение обратных задач гравиметрии для нескольких контактовых поверхностей // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1982. — № 3. — С. 46—61.
17. Страхов В. Н., Лапина М. И. Прямая и обратная задачи гравиметрии и магнитометрии для произвольных однородных многогранников // Теория и практика интерпретации гравитационных и магнитных полей в СССР. — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 3—87.

ИМГиГ ДВО РАН
Южно-Сахалинск

Поступила в редакцию
28 мая 1993 г.

УДК 551.243

А. О. Морин

ВЛИЯНИЕ ЭКСПОЗИЦИИ ОБНАЖЕНИЯ НА ИЗМЕРЕНИЕ ОРИЕНТИРОВОК ТЕКТОНИЧЕСКИХ ТРЕЩИН

При анализе ориентировки более 60 тысяч трещин, измеренных на 457 вертикальных скальных обнажениях в породах различного возраста и генезиса, установлено, что на практике число попавших в выборку трещин, субпараллельных обнажению, занижается по сравнению с субперпендикулярными к нему в десятки раз. Получено аналитическое выражение зависимости числа измеренных трещин от ориентировки обнажения, что позволило предложить поправочный коэффициент, учитывающий фактическую вероятность измерения трещины. Введение поправки на экспозицию обнажения дает возможность более адекватно оценивать тектоническую трещиноватость.

Во многих методических руководствах по изучению тектонической трещиноватости указывается на необходимость выбора при массовом замере трещиноватости обнажений с различно ориентированными стенками*. Это мотивируется тем, что трещины, субпараллельные плоской стенке обнажения, имеют значительно меньшую вероятность попасть в измеренную выборку, снижая тем самым ее репрезентативность. Однако избежать измерений трещиноватости на плоских скальных обнажениях практически невозможно. С другой стороны, реальные обнажения, в какой-то мере, трехмерны, и некоторая часть трещин, субпараллельных обнажению, при обычных в исследовании трещиноватости массовых замерах неизбежно попадает в выборку. Поскольку сведений о степени влияния ориентировки обнажения на измеренную трещиноватость не приводится, то возникает необходимость количественно оценить фактическую степень этого влияния и необходимость введения соответствующих поправок.

Исходные данные и методика. Исходными данными послужили массовые невыборочные измерения ориентировок трещин в Западном Приохотье в породах различного возраста (нижний архей — мел) и генезиса. На каждом обнажении, обычно представляющем собой скальную стенку, ориентировка которой фиксировалась, измерялась ориентировка 100—170 трещин. Расстояние между точками наблюдения, как правило, более километра. Всего в анализ вовлечены данные по 457 обнажениям, при этом они приблизительно равномерно распределены по ориентировке (рис. 1).

Методика анализа основана на очевидном утверждении, что у полной совокупности ориентировок трещин (60 806 измерений), характеризующейся их приблизительно равномерным пространственным распределением при

* Николаев П. Н. Методика тектонодинамического анализа. — М.: Недра, 1992.