

УДК 550.83:551.24(571.6)

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГРАВИТАЦИОННЫХ АНОМАЛИЙ НА ДАЛЬНЕМ ВОСТОКЕ РОССИИ

А.М. Петрищевский

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, г. Биробиджан

E-mail: petris@stl.ru

Анализируются идеология, методика и геологические результаты интерпретации гравитационных аномалий на Дальнем Востоке России. Рассматриваются содержание и проблемы аппроксимационных, частотных и корреляционных методов интерпретации, комбинирование которых с традиционными методами подбора плотностных неоднородностей сужает область неоднозначности гравитационных моделей. Приводятся примеры геологической совместимости аппроксимационных конструкций, полученных в разных классах модельных тел.

Ключевые слова:

Гравитационное моделирование, методология, земная кора, верхняя мантия.

В Восточной Сибири и на Дальнем Востоке России гравиразведка традиционно используется при изучении глубинного строения земной коры и верхней мантии, выявлении связей глубинных структур с размещением месторождений полезных ископаемых и геодинамической активностью тектоносферы. Однако сильнейшим препятствием для решений перечисленных задач является неоднозначность моделирования, возрастающая с увеличением числа элементарных масс (или тел), вовлекаемых в расчеты. Последнее обстоятельство вынуждает исследователей искать и реализовывать различные подходы к интерпретации гравитационных аномалий, которые в сложившихся геолого-геофизических условиях конкретных районов (степень изученности, особенности расслоения разрезов, характер магматических проявлений, частотный спектр гравитационных аномалий, и др.) позволяют с различной степенью эффективности решать те, или иные, частные геологические задачи. Эти подходы можно сгруппировать в четыре основные группы методов: прямых аналитических, корреляционных, частотных и аппроксимационных (обратные задачи без прямых).

Наиболее широко распространенные **прямые аналитические методы** основываются на итерационных решениях прямых задач гравитационного потенциала с целью подбора распределений плотности под наблюдаемые гравитационные аномалии, или частотные составляющие этих аномалий, выделяемые в результате трансформаций исходного поля (преимущественно пересчеты вверх и осреднение), или вычитания из наблюденных аномалий региональных составляющих, корреляционно связанных с сейсмическими (скоростными) границами раздела земной коры и верхней мантии. Эффективность этих методов определяется сложностью разрезов земной коры и наличием априорной (геологической, сейсмической, геоэлектрической, петрофизической и др.) информации. Меньшей неоднозначностью, в этой группе моделей, характеризуются построения В.И. Исаева [1] и Л.И. Брянского [2]. Первый использует глубокие

скважины и детальную сейсморазведку при исследовании осадочного чехла, второй — упрощает разрезы земной коры до трехслойного (вулканогенно-осадочный, гранитно-метаморфический и мафический), в которых границы слоев закрепляются по данным ГСЗ.

3D-интерпретация гравитационных аномалий по алгоритмам 8-угольных [3] и 3-угольных [4] призм применяется при моделировании рельефа подошвы вулканических депрессий (рис. 1) и глубинных границ гранитоидных тел (рис. 2). В обоих случаях 3D-моделям предшествуют опорные 2D-пересечения тел, или структур. Однако, гораздо более широко распространены 3-мерные отображения плотностных неоднородностей земной коры и верхней мантии, получаемые в результате обобщения 2D-пересечений исследуемых структур [5, 6].

Корреляционные методы построения глубинных границ земной коры активно применяются в Забайкалье [7], в южных районах Дальнего Востока [8] и акваториях окраинных морей [9, 10]. Эффективность этих моделей зависит от тесноты связей моделируемых границ с теми, или иными, частотными составляющими (трансформантами) гравитационных аномалий, а также количества опорной информации (густоты сейсмических профилей). Для более надежного моделирования глубинных границ приходится разбивать исследуемые территории на участки, в каждом из которых выбирать свои компоненты гравитационного поля и вычислять свои уравнения регрессии. Попытки же распространения обобщенных корреляционных уравнений на обширные территории позволяют выявить только самые общие черты глубинного строения земной коры (утонения последней под впадинами и утолщения под складчатыми системами) [8, 10], которые в деталях нередко противоречат другим геофизическим моделям (МОВЗ, МТЗ, гравиметрическим). Хорошим примером реализации корреляционного подхода к интерпретации гравитационных аномалий является моделирование рельефа подошвы осадочной толщи Охотского моря с помощью многочленных полиномов ($n=8$), учиты-

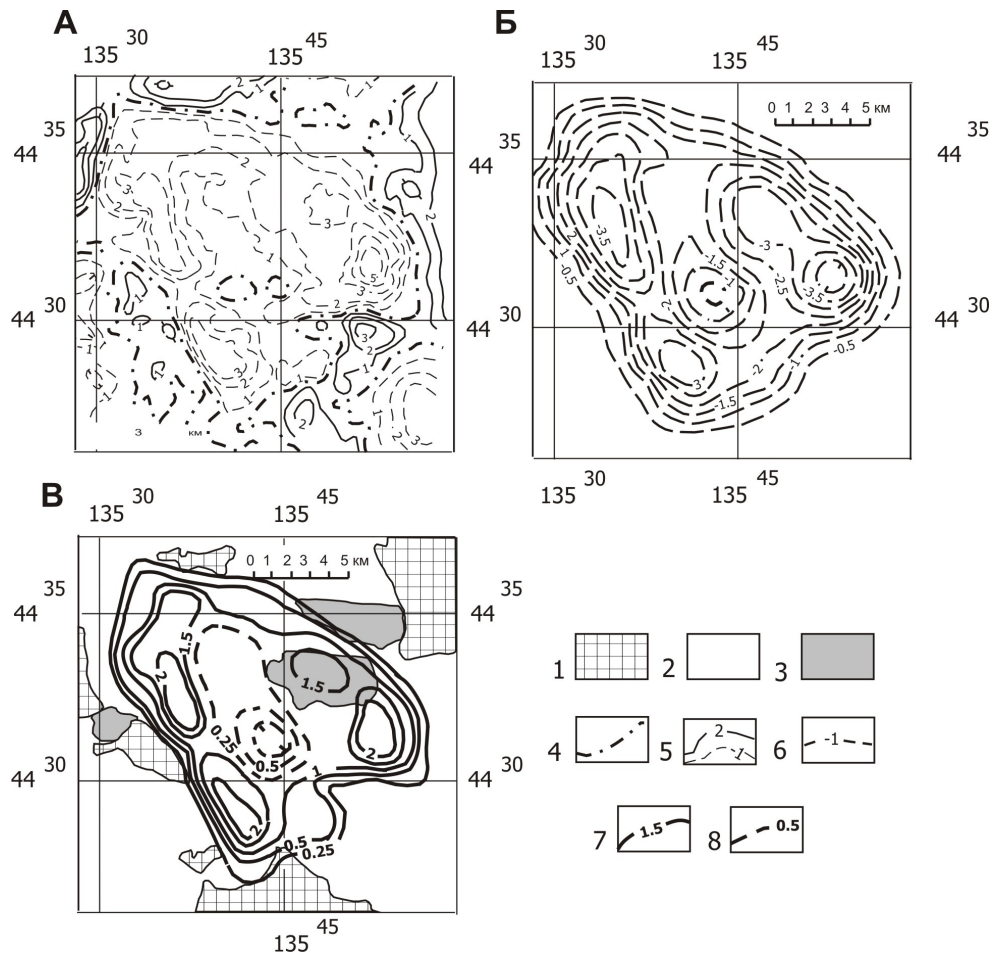


Рис. 1. 3D-модель Дальнегорской вулканической депрессии (Приморский край) [3]: 1) вулканический покров; 2) складчатый фундамент; 3) синвулканические граниты; 4) нулевая изоаномала силы тяжести на карте «а»; 5) положительные (сплошная линия) и отрицательные (пунктир) изоаномалы на карте «а»; 6) изолинии расчетных гравитационных аномалий вулканического покрова на карте «б»; 7, 8) изопахиты мощности ольгинского (7) и дальнегорского (8) вулканических комплексов. А – карта остаточных (после осреднения радиусом 15 км) гравитационных аномалий, Б – карта расчетных гравитационных аномалий, В – схема мощности рельефа подошвы вулканического покрова

вающих осредненный рельеф дна и остаточные гравитационные аномалии после исключения гравитационного эффекта глубинных сейсмических границ [9].

Частотные методы интерпретации гравитационных аномалий, основывающиеся на преобразованиях Фурье и автокорреляционных характеристиках гравитационных аномалий, связанных соотношением Хинчина-Виннера, не пользуются широким распространением на Дальнем Востоке. В их числе следует упомянуть метод полного нормированного градиента (В.М. Березкин), программное обеспечение которого до 1992 г. входило в стандартные пакеты обработки гравиметрической информации (АСОГ, АСОГД, ВИРГ и др.); метод Спектора-Гранта, эпизодически привлекавшийся при построении условных гравитирующих границ 2-го класса в районах с отсутствием априорной сейсмической информации, и автокорреляционное гравитационное зондирование [11]. Последний метод представляет собой пространственно-ча-

стотную развертку вероятных источников гравитационных аномалий в классе эквивалентных точечных масс и в благоприятных случаях позволяет выявлять особенности расслоения тектоносферы без априорной сейсмической и петрофизической информации, в первую очередь – границ, ниже которых отсутствуют источники гравитационных аномалий.

Геологические возможности частотных методов сводятся к выявлению и пространственной корреляции лишь сингулярных (особых) точек плотностных неоднородностей, однако использование результатов частотного моделирования в качестве 1-го приближения к стандартным гравитационным моделям (при подборе плотностных разрезов) сужает область неоднозначности последних. В приводимом примере (рис. 3) зоны сгущения корреляционных кривых (Z_p) совпадают с границами кристаллического слоя земной коры в правой части разреза и согласуются с геологическими данными о надвигании Становой складчатой системы на Ал-

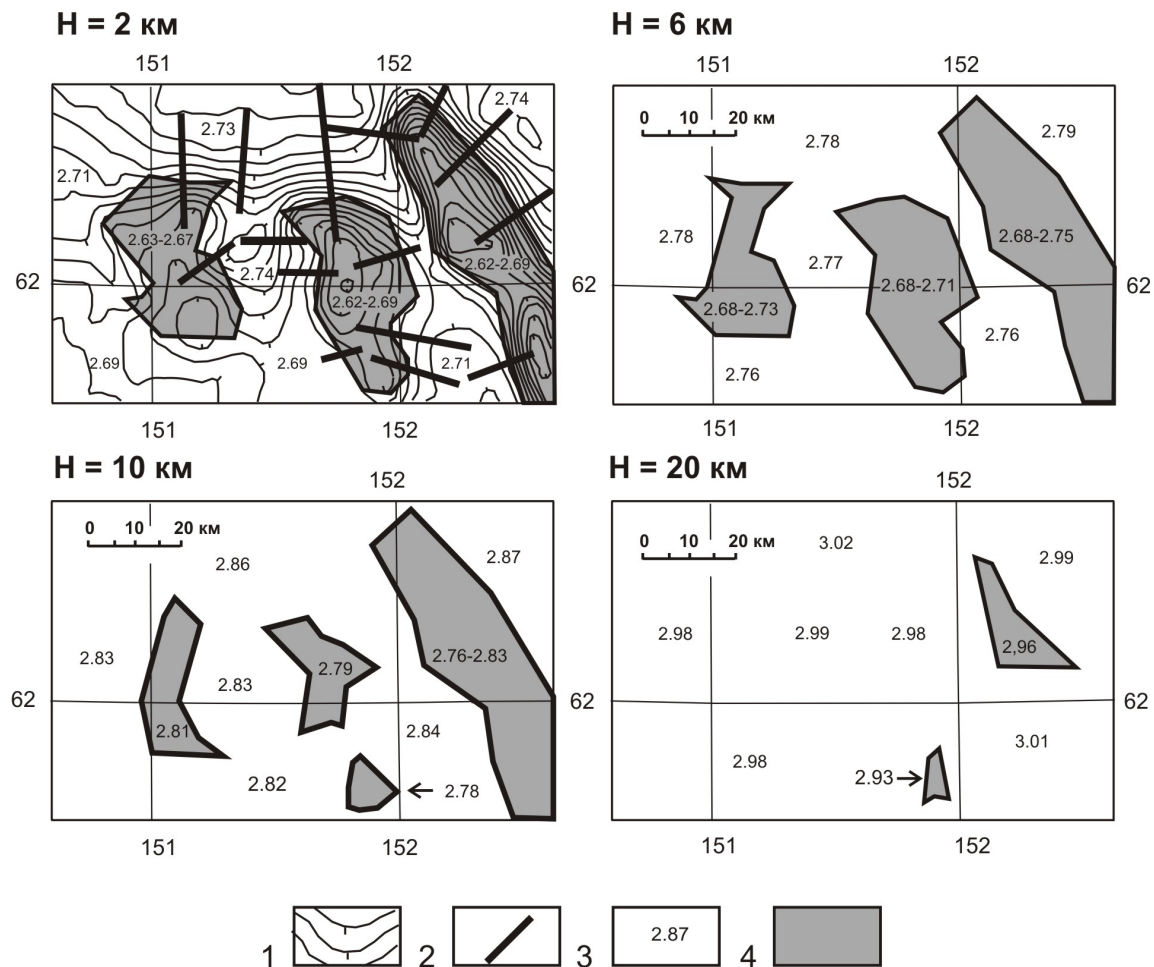


Рис. 2. Послойные срезы 3D-модели позднемезозойских гранитных массивов на юго-восточном фланге Главного Колымского гранитного пояса [4]: 1) изоаномалы наблюдаемого гравитационного поля; 2) профили первого приближения к 3D-модели (аппроксимация тел вертикальными призмами); 3) расчетная плотность сред, г/см³; 4) гранитоиды

данский щит. В интервале профиля $x=170...220$ км хорошо проявлена структура растяжения земной коры, разделяющая Байкало-Витимский и Алдано-Становой террейны.

Аппроксимационные методы решения обратных задач для тел простой геометрической формы составляют весьма широкую группу. На Дальнем Востоке в разное время нашли применение методы интерпретации аномалий над уступами (Дж. Стэнли), вертикальными параллелепипедами (Ю.Я. Вашилов), вертикальными цилиндрами (В.А. Абрамов), депрессиями (Я. Сванкара), призматическими телами (У. Якоби) и точечными массами. Методы единичных (идеализированных и изолированных в пространстве) аппроксимаций ушли в прошлое, однако множественная интерпретация гравитационных аномалий определенного модельного класса пока еще имеет геологическую перспективу, поскольку статистическая обработка и генерализация результатов множественного моделирования способны объективно (т. е. не зависимо от предшествующих геолого-геофизических данных) характеризовать глубинное строение земной коры и верхней мантии.

В результате множественной интерпретации гравитационных аномалий, близких по форме к аномалиям от параллелепипедов с вертикальными гранями, Ю.Я. Вашилов обнаружил приуроченность верхних (Z_1) и нижних (Z_2) ограничений модельных тел к сейсмическим и стратиграфическим границам раздела земной коры [12], что позволило ему строить схемы статистического рельефа этих границ на территориях Северо-Востока России и Западной Сибири по значениям Z_1 и Z_2 элементарных блоков. Вычисляемые значения аномальной плотности блоков при нанесении на схемы-срезы разных глубинных уровней (обычно: 10, 20, 30, 40 и 60 км) являются источником информации о латеральной плотностной неоднородности земной коры и подкорового слоя верхней мантии [13]. По прошествии 30 лет его исследований стало ясно, что такие совпадения обязаны существованию многочисленных корово-мантийных и внутрикоровых срывов, связанных с расщеплениями и горизонтальными смещениями тектоносферных оболочек вращающейся Земли под влиянием меняющихся во времени ротационных напряжений. Для

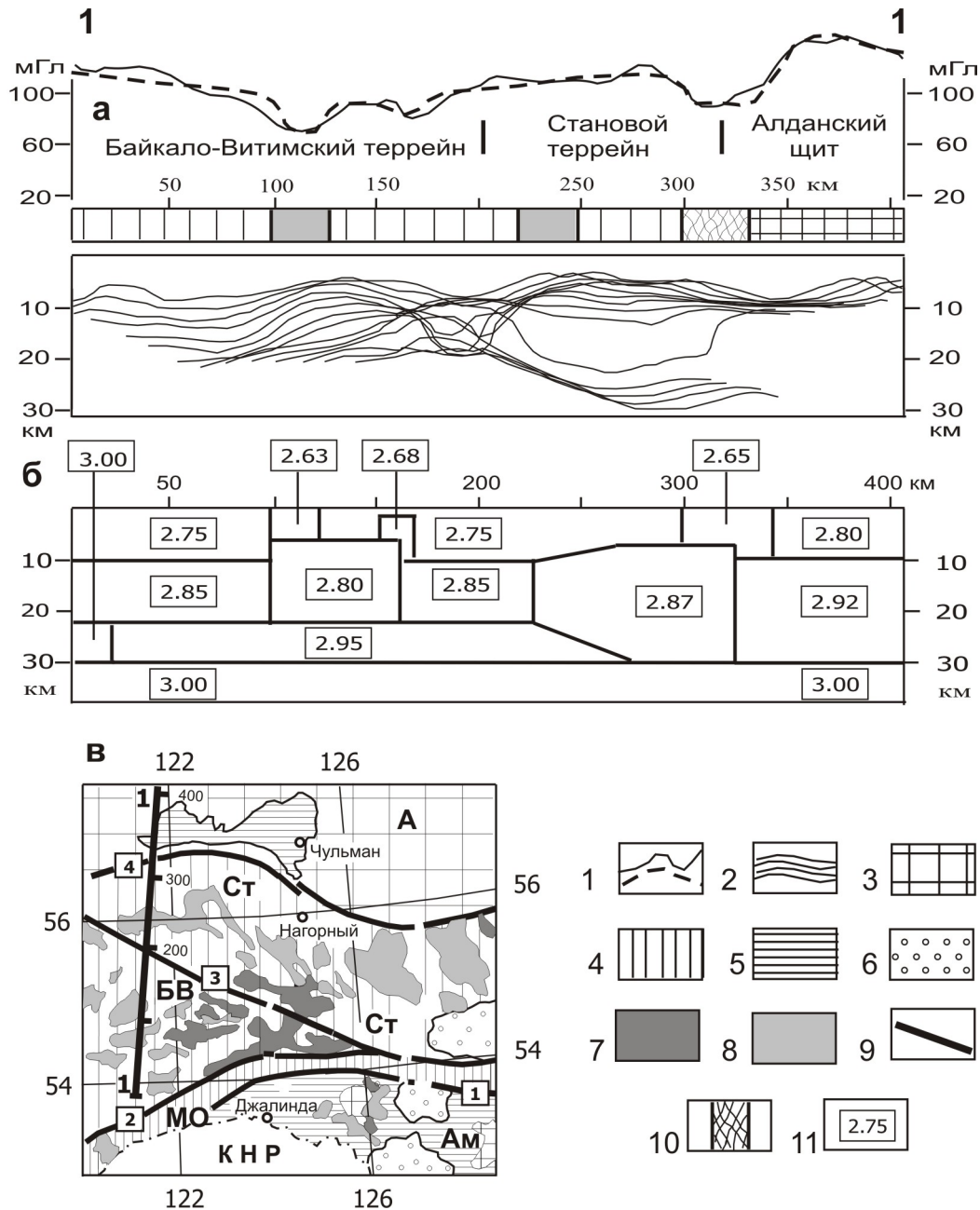


Рис. 3. Автокорреляционный (а) и плотностной (б) разрезы земной коры юго-восточной окраины Северо-Азиатского кратона (в): 1) наблюдаемая (сплошная) и расчетная (пунктир) аномалии силы тяжести; 2) корреляционные кривые Z_1 ; 3–6) тектонические комплексы: архейские (3), палеозойские (4), мезозойские (5) и кайнозойские (6); 7, 8) гранитоиды мезозойские (7) и палеозойские (8); 9) глубинные разломы; 10) зона Южно-Якутского разлома в разрезе 1-1; 11) расчетная плотность блоков, г/см³. Обозначения структур на схеме «в»: А – Алданский щит; террейны: Ст – Становой, Ам – Амурский, БВ – Байкало-Витимский; МО – Монголо-Охотская сутура. Обозначения разломов (цифры в квадратах): 1 – Южно-Тукурингринский, 2 – Монголо-Охотский, 3 – Джелтулакский, 4 – Южно-Якутский

перехода к абсолютной плотности Ю.Я. Вашиловым использовались петрофизические данные на поверхности и в скважинах, а в более глубоких срезах – корреляционные связи плотности со скоростью сейсмических волн в опорных разрезах.

Вторым примером аппроксимационного подхода к множественной интерпретации гравитационных аномалий являются модели А.М. Петрищевского [14, 15] в классе источников, удовлетворяю-

щих условию компактности: $Z_1 > 0,5D$ (D – ширина тела). Результаты имитационного моделирования [14] свидетельствуют о том, что аппроксимация локальных квазисимметричных гравитационных аномалий эффектами «компактных» источников применима для геологических тел и структур широкого пространственного диапазона: $5 > \Delta H/D > 0,1$, где ΔH – вертикальная мощность элементарного геологического тела. Свойства экви-

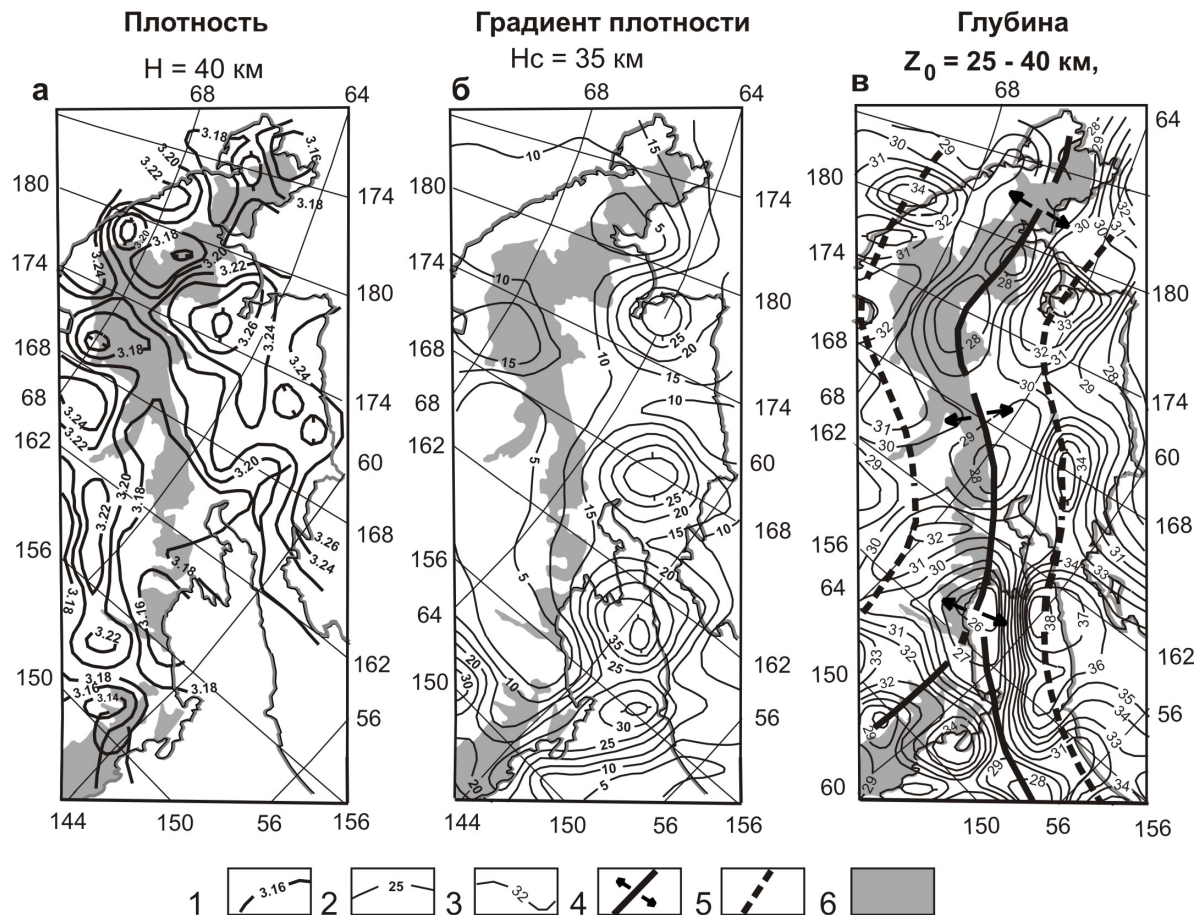


Рис. 4. Плотность (а), градиенты плотности (б) и распределение центров плотностных неоднородностей (в) в основании Охотско-Чукотского вулканического пояса. Изолинии: 1) плотности после обработки данных Ю.Я. Ващилова [13], 2) градиентов сферической плотности [16], 3) глубин залегания центров масс [16]; 4) Охотско-Чукотский вулканический пояс

валентности и аддитивности гравитационного потенциала при множественной интерпретации аномалий позволяют отказаться от идентификации геологической природы элементарных квазисимметричных гравитационных возмущений, каждое из которых можно считать случайным результатом аддитивного (и эквивалентного) влияния множества источников разной геологической природы, которые, в совокупности, несут обобщенную геологическую информацию о свойствах тектонических сред.

Опыт проведенных исследований свидетельствует о том, что распределения центров масс (Z_0) отражают характер внутренней структуры (разрывные деформации, складчатость, распределение магматических тел и др.) тектонических сред определенного возраста и глубинного уровня, вследствие чего эти среды часто характеризуются присущим им рисунком изолиний (Z_0), резко изменяющимся при переходах с уровня на уровень (из слоя в слой) [14, 16]. Последнее обстоятельство позволяет диагностировать и районировать в 3D-пространстве статистические границы раздела тектонических сред, выявлять глубинные разломы, структуры растяжения и сжатия. В подавляющем

большинстве случаев эти границы совпадают с геоэлектрическими, сейсмическими и фазовыми границами раздела земной коры и верхней мантии.

Тождественность объемного и сферического гравитационного потенциалов позволяет вычислить вертикальный градиент эквивалентного сферического слоя (μ_z), с которым связаны реологические свойства тектонических сред [15]. 3D-модели μ_z -параметра позволяют выявлять и картировать глубинные границы литосферных плит и крупных террейнов [17], исследовать зональность структур центрального типа плюмовой природы [18]; диагностировать среды с нарушенным фазовым состоянием вещества верхней мантии под гранитоидными и вулканическими поясами. Один из таких примеров приводится на рис. 4, где область вязкого (судя по низким значениям электрического сопротивления – частично расплавленного) подкорового слоя под Охотско-Чукотским вулканическим поясом (ОЧВП) регистрируется понижениями градиентов плотности и плотности двумя независимыми расчетными процедурами.

Несмотря на неоднозначность количественной интерпретации каждой элементарной аномалии, генерализация и комплексная интерпретация ра-

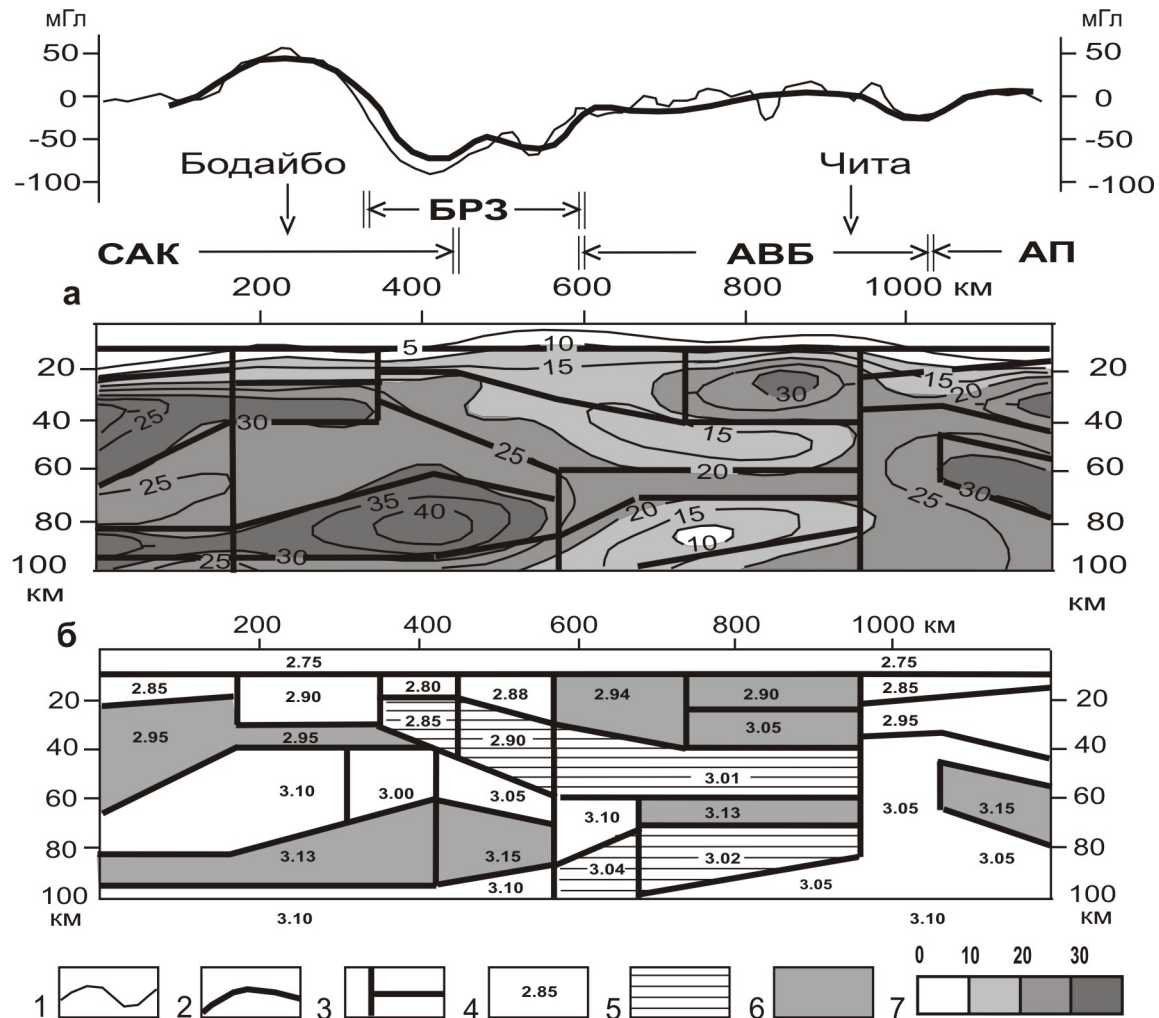


Рис. 5. Распределение градиентов сферической плотности (а) и плотности (б) в тектоносфере Байкаля: 1) графики наблюдаемых (тонкая линия) и расчетных (толстая) гравитационных аномалий; 2) изолинии градиентов плотности эквивалентных сферических источников (1 ед.= 10^2 кг/м³/км); 3) границы плотностных сред; 4) расчетная плотность сред, г/см³; 5, 6) среды пониженной вязкости (5) и повышенной жесткости (6) в разрезе «б»; 7) шкала раскраски разреза «а»

спределений трех формализованных параметров, описывающих плотностную неоднородность верхней мантии (рис. 4), позволила существенно уточнить тектоническую природу ОЧВП (известно более 10 точек зрения на этот счет). По полученным данным, Охотско-Чукотский вулканический пояс приурочен к региональной структуре растяжения, сопровождаемой реологическим разуплотнением и поднятием глубинных плотностных неоднородностей. S-образная форма пояса обусловлена трансрегиональным трансформным правым сдвигом на позднемезозойской границе Тихоокеанской плиты с Евразийским континентом (к этому времени с Евразией уже сомкнулись Северо-Американская и буферная Колымо-Омолонская плиты [17]).

Формализованные аппроксимационные гравитационные модели, получаемые без привлечения вспомогательной геолого-геофизической информации (и особенно — в классах обратных задач с един-

ственным решением), легко проверяемы стандартными решениями прямых задач гравитационного потенциала, в том числе — методами подбора плотностных разрезов. Будучи использованы в качестве первого приближения, инаприорные аппроксимационные модели существенно сужают область неоднозначности прямых итерационных задач и, соответственно, способствуют большей определенности и объективности геологических выводов. Примеры совместимости результатов обратных аппроксимационных и прямых методов интерпретации гравитационных аномалий показаны в работах [3, 4, 16].

Еще одним примером комбинированного подхода является разрез тектоносферы Байкальской рифтовой зоны (рис. 5), иллюстрирующий структурные особенности пассивного рифтогенеза. Этот, и другие разрезы, обнаружили в Байкале отсутствие структурной связи верхнекоровых структур растяжения с глубинными неоднородно-

стями верхней мантии, которые могли бы быть связаны с раздвижением литосферных плит, поднятием астеносферы и сокращением мощности коры (типичными атрибутами континентальных рифтов), а зоны подкорового и астеносферного разуплотнений верхней мантии в Забайкалье оказались смещенными на юго-восток далеко за пределы рифтовой зоны. Существование наклонного слоя пониженной вязкости (детачмента) в основании рифтовой зоны объясняет одностороннюю юго-восточную направленность коровых процессов растяжения, резко асимметричный профиль ложа кайнозойских впадин (Байкальской, Баргузинской и др.), отсутствие в пределах рифта базальтоидных проявлений и значительное (на 150...200 км) смещение к юго-востоку от рифта зон пониженных скоростей сейсмических волн. На основании полученных данных сделан вывод, что мезозойская и кайнозойская история Забайкальской горной страны определялась гравитационными (или ротационными) отрывами горных соору-

жений и верхнекоровых тектонических пластин от Северо-Азиатского кратона и сползанием их в сторону Забайкальского астенолита. Байкальская впадина повторяет один из многочисленных эпизодов тектонического прошлого Забайкалья (в интервале 250...350 млн л).

Исходя из сделанного обзора, следует ожидать, что, по причине сложности геологических условий и слабой изученности Дальневосточного региона, повышение геолого-информационной значимости гравитационных моделей на Дальнем Востоке в обозримой перспективе будет связано, главным образом, с развитием, модернизацией и адаптацией аппроксимационных методов решений обратных задач, не требующих подробных априорных сведений о строении и вещественном составе моделируемых сред. Наиболее оптимальным представляется комбинирование методов интерпретации гравитационных аномалий в направлении от аппроксимационных конструкций через 2D-приближения к 3D-моделированию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Исаев В.И., Волкова Н.А. Прогнозные оценки перспективности объектов нефтегазопромысловых работ методами геоплотностного и палеотемпературного моделирования // Тихоокеанская геология. – 1997. – Т. 16. – № 2. – С. 49–59.
- Брянский Л.И. Плотностная структура земной коры и верхов мантии восточной окраины Азиатского континента. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 142 с.
- Юшманов Ю.П., Петрищевский А.М. Тектоника, глубинное строение и металлогения Прибрежной зоны Южного Сихотэ-Алиня. – Владивосток: Дальнаука, 2004. – 111 с.
- Вашилов Ю.Я., Гайдай Н.К., Сахно О.В. Трехмерная глубинная плотностная модель Паутовского горста и ее геологическая интерпретация (Северо-Восток России) // Тихоокеанская геология. – 2008. – Т. 27. – № 4. – С. 22–38.
- Исаев В.И. Нефтегазоносность Дальневосточного региона по данным гравиметрии и геотермии: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. – Хабаровск, 2003. – 48 с.
- Малышев Ю.А., Подгорный В.Я., Шевченко Б.Ф. и др. Глубинное строение структур ограничения Амурской литосферной плиты // Тихоокеанская геология. – 2007. – Т. 26. – № 2. – С. 3–17.
- Зорин Ю.А., Новоселова М.Р., Турутанов Е.Х., Кожевников В.М. Строение литосферы Монголо-Охотской горной страны // Геодинамика внутриконтинентальных горных областей. – Новосибирск: Наука, 1990. – С. 143–154.
- Тузев И.К., Хе Гоци, Врублевский А.А., Рейнлиб Э.Л., Бай Данхай. Некоторые особенности строения северо-востока КНР и Дальнего Востока России // Структура и геокинематика литосферы Востока России. – Магадан: СВКНИИ, 1993. – С. 5–19.
- Бабошина В.А., Терещенков А.А., Харахинов В.В. Гравитационное поле Охотоморского региона и его интерпретация в комплексе с батиметрическими и сейсмическими данными // Тихоокеанская геология. – 1985. – № 2. – С. 49–59.
- Структура и динамика литосферы и астеносферы Охотоморского региона / Под ред. А.Г. Родникова. – М.: Национальный геофизический комитет РАН, 1996. – 337 с.
- Петрищевский А.М. Гравитационные автокорреляционные индикаторы глубинных геологических структур // Тихоокеанская геология. – 2004. – Т. 23. – № 4. – С. 13–24.
- Вашилов Ю.Я. Блоковослоистая модель земной коры и верхней мантии. – М.: Наука, 1984. – 240 с.
- Вашилов Ю.Я. Глубинная структура, геодинамика и геокинематика Северо-Востока России // Структура и геокинематика литосферы Востока России. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1993. – С. 5–19.
- Петрищевский А.М. «Теневые» гравитационные модели глубинных структур земной коры и верхней мантии // Геофизика. – 2004. – № 4. – С. 48–54.
- Петрищевский А.М. Гравитационный индикатор реологических свойств тектоносферы дальневосточных окраин России // Физика Земли. – 2006. – № 8. – С. 43–59.
- Петрищевский А.М. Глубинные структуры земной коры и верхней мантии Северо-Востока России // Литосфера. – 2007. – № 1. – С. 46–64.
- Ханчук А.И., Петрищевский А.М. Астеносфера и плиты Северо-Восточной Азии // Доклады РАН. Геофизика. – 2007. – Т. 412. – № 5. – С. 689–693.
- Петрищевский А.М., Ханчук А.И. Кайнозойский плюм в Верхнем Приамурье // Доклады РАН. Геофизика. – 2006. – Т. 406. – № 3. – С. 384–387.

Поступила 06.10.2008 г.