

УДК 550.831

ПЛОТНОСТНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ В ЗЕМНОЙ КОРЕ, ГИПОТЕЗА ИЗОСТАЗИИ И ПОВЕРХНОСТЬ МОХО

Ю.В. Антонов

Воронежский государственный университет

Приходится признать, что ... гипотеза [изостазии] является даже вредной, так как она отвлекает нас от простых и практически важных и нужных соотношений и заставляет мысль обращаться к красивым, быть может, но практически ненужным и явно недоказуемым построениям.

*А.Д. Архангельский
из кн. «Геология и гравиметрия»*

Земная кора по плотности неоднородна. Судя по знаку локальных аномалий силы тяжести, плотностные неоднородности любых рангов и размеров в земной коре относительно знака избыточной плотности распределены поровну. Нередко плотностные неоднородности разного знака, когда они расположены рядом или особенно друг над другом, в гравитационном поле проявляются очень слабо или совсем не проявляются из-за взаимной компенсации притяжений. По существу из-за взаимной компенсации притяжений идет потеря информативности и снижение эффективности гравиметрических исследований. Такие ситуации в гравиметрической разведке рассматривались чрезвычайно редко [1–8], и мы по мере возможности постараемся восполнить этот пробел.

Рассмотрим ряд возможных ситуаций образования скомпенсированных плотностных неоднородностей в земной коре, связанных прямо или косвенно с изостатическим равновесием, приведем примеры существования скомпенсированных плотностных неоднородностей, а также выскажем предположения об их образовании. Ранее автором данной статьи этот вопрос затрагивался в работе Ю.В. Антонова [1], поэтому данная статья является ее логическим продолжением. Кроме того, в статье приводятся результаты математического моделирования, которые находятся в согласии с высказываемыми предположениями. Сразу же оговоримся, что рассматривается ограниченный ряд скомпенсированных плотностных неоднородностей. На самом деле таких неод-

нородностей, вероятно, очень много и отличаются они друг от друга по генезису образования, форме, историческому развитию и т.д.

На современном этапе геологического развития Земли мы наблюдаем извержения вулканов. Вулканизм свойственен всем этапам развития Земли, но и также для всех планет Солнечной системы. Вулканизм – это единственно реальный источник перемещения масс в земной коре, а все остальные предположения о перемещении масс либо из области гипотез, либо, если они имеют место быть, незначительны. Все массы, которые выбрасывают на поверхность вулканы, затем с помощью денудации практически все за больший или меньший временной период перемещаются в другое место, но это перемещение масс производится уже по поверхности планеты.

Возьмем какой-то гипотетический вулкан. Пусть идет вынос масс с некоторой глубины земной коры (рис. 1а). Тогда мы вправе предположить, что на этой глубине возникает зона разуплотнения. Зону выноса материала на рисунке условно обозначим цилиндром со знаком минус. Излившиеся массы выше поверхности геоида создают, как правило, положительные значения избыточной плотности. Очевидно также, что общая масса, взятая в некотором замкнутом пространстве, включающем в себя области генерирования расплавов и области их выноса, чаще всего на достаточно большом отрезке геологического времени остается постоянной. В результате геологических процессов в земной

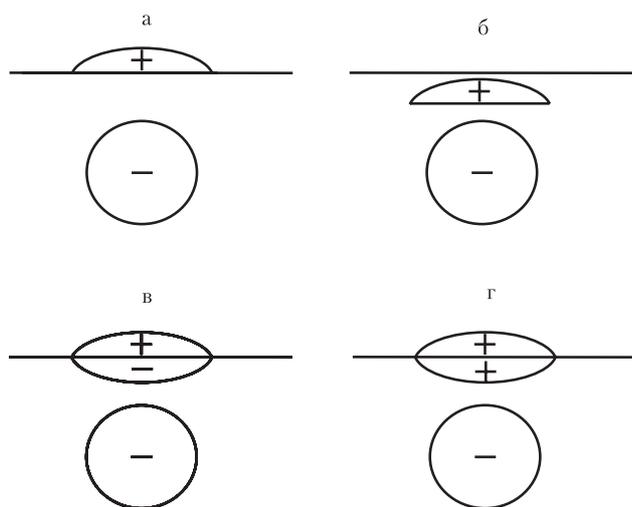


Рис. 1. Предполагаемые модели образования зон компенсации при вулканической деятельности

коре образуются плотностные неоднородности противоположного знака, которые создают на поверхности аномалии силы тяжести. Гравитационные поля этих неоднородностей в некоторой степени компенсируют друг друга. Как было показано Страховым В.Н. [6], теоретически возможна ситуация, когда гравитационное поле равно нулю при наличии неоднородностей с различными знаками избыточной плотности. Такие примеры, когда притягивающие массы создают нулевое или близкое к нулю поле силы тяжести, довольно многочисленны и теоретически обоснованы.

Но вернемся к рис. 1, который достаточно удачно описывает морфологию геологического строения земной коры в зонах островных дуг и субдукций, к которым приурочены вулканы. Пусть идет вынос вещества из нижних слоев в верхние слои земной коры, что мы наблюдаем в настоящее время на действующих вулканах. Вынесенное вещество может распределиться на поверхности Земли или внутри верхней части геологического разреза в виде тел, напоминающих конхоиду Слюза [6]. Такие геологические образования в земной коре тоже наблюдаются: конусы вулканов, лакколиты и т. д. В связи с изложенным выше можно рассмотреть несколько ситуаций (рис. 1). При этом будем считать, что очаг выноса материала имеет отрицательную избыточную плотность, а конус вынесенного материала – положительную.

Первый случай довольно тривиален. Пусть вынесенные массы располагаются выше уровня геоида (рис. 1а). Если не происходило существенного (на дальние расстояния) сноса излившейся лавы, то в этом случае гравитационная аномалия в редукции Фая очевидно будет близка к нулю. При редуцировании наблюдаемых значений силы тяжести к уровню моря (редукция Буге) получаем отрицательную аномалию, обусловленную зоной разуплотнения (на рис. 1 – это условно круговой цилиндр). Просто в данном случае при редуцировании путем решения прямой задачи (учет притяжения плос-

копараллельного слоя с поправкой за рельеф) решается задача разделения сложных аномалий силы тяжести. После этого остается вопрос идентификации аномалии силы тяжести: связана ли выявленная аномалия с контактной поверхностью или очагом выноса материала? Практика показывает, что измерение вертикального градиента вдобавок к силе тяжести позволяет почти однозначно решить этот вопрос.

В результате геологического развития процессы денудации и другие геологические процессы могут унести вынесенный на поверхность материал в другое место, в этом случае на поверхности Земли наблюдаются интенсивные отрицательные аномалии. В качестве примера можно привести Белозерскую аномалию силы тяжести на Русской платформе.

Второй пример (рис. 1б) соответствует ситуации, когда вынос материала производится ниже уровня приведения, а сам вынесенный материал образует тела в виде батолитов, лакколитов и т.п. В этом случае при перемещении материала в земной коре происходит плотностная дифференциация, но общая масса горных пород остается неизменной. Таким образом, поскольку верхняя часть геологического разреза переуплотнена, то в силу взаимной компенсации притяжений от положительных и отрицательных избыточных масс следует ожидать небольших амплитуд аномалий силы тяжести.

Третий и четвертый примеры (рис. 2в, г) являются промежуточными вариантами, когда часть перемещенных масс будет расположена выше уровня поверхности геоида, а часть – ниже. Величина компенсации притяжений будет зависеть от того, какая часть перенесенных масс расположится относительно уровня поверхности.

Не исключен вариант, когда массы, расположенные ниже уровня поверхности, будут иметь отрицательную избыточную плотность относительно вмещающей толщи горных пород верхней части земной коры. Это возможно, например, при внедрении интрузива, когда происходит резкое изменение Р-Т условий. Внедрившийся расплав резко увеличивает свой объем и в результате этого уменьшается плотность.

Здесь очевидна общая тенденция. Чем больше перенесенных масс окажется выше поверхности приведения, тем больше вероятность, что суммарная аномалия силы тяжести окажется отрицательной.

В последние два десятилетия автором статьи проводились исследования по измерению силы тяжести совместно с измерением вертикального градиента. Как показали эти исследования, комплексные гравиметрические наблюдения повышают эффективность геологической интерпретации, в частности позволяют выявить скомпенсированные плотностные неоднородности разного знака и определить природу этих неоднородностей.

Покажем это на достаточно простом примере. Возьмем две прямоугольные призмы (рис. 2). Будем считать, что верхняя призма имеет положительную избыточную плотность и образована она за счет внедрившихся масс снизу. Нижняя призма имеет отрицательную избыточную плотность за счет выноса масс.

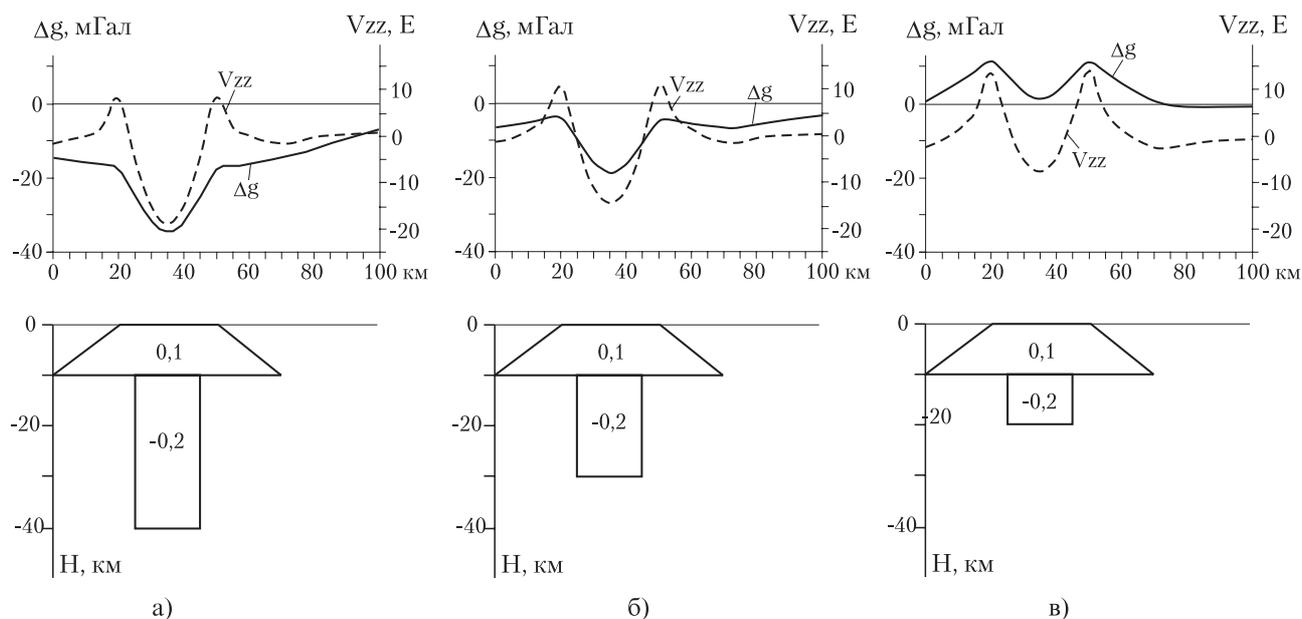


Рис. 2. Расчеты аномалий силы тяжести и ее вертикального градиента над зонами с коенсирующимися неоднородностями

Меняя параметры нижней призмы, при практически мало изменяющейся аномалии градиента получаем амплитуду силы тяжести от отрицательных до положительных значений. На этом примере просто показываем принципиальную возможность существования различных соотношений между Δg и V_{zz} . Это подтверждают практические измерения [5].

Анализ совместно измеренных аномалий вертикального градиента и силы тяжести привел к выводам, которые подтверждают изложенные выше утверждения, а также ранее высказанные предположения [1–5] о значительных разуплотнениях в земной коре. А это по-новому заставляет взглянуть на проблему изостатического равновесия в земной коре и природу поверхности Мохо.

Приведем практические примеры наблюдаемых аномалий силы тяжести и вертикального градиента, которые, по мнению автора, подтверждают варианты рассмотренных моделей. Для этого возьмем Русскую платформу и Среднюю Азию.

На территории Воронежского кристаллического массива силами кафедры геофизики Воронежского государственного университета проводятся измерения вертикального градиента силы тяжести.

При выполнении работ в поле зрения попали излучины реки Дон, на части которых были проведены площадные измерения вертикального градиента. Дело в том, что излучины рек очень часто связаны с контрастными геологическими объектами. Особое внимание обращают на себя Верхнее-Мамонская и Лискинская аномалии [2,5].

Например, Верхнее-Мамонская площадь, приуроченная к юго-восточному замыканию Курской маг-

нитной аномалии (КМА) в гравитационном поле [2], отмечается повышенными значениями силы тяжести. Совершенно другой характер имеет поле вертикального градиента силы тяжести. Простираение аномалии градиента ортогонально простираению магнитного и гравитационного полей, да к тому же имеет отрицательные значения. В чем же заключается парадокс этого явления? Нам представляется, что в допротерозойское время (в протерозое были сформированы основные структуры КМА) произошел перенос масс с нижних частей земной коры на поверхность Земли или близко к поверхности. Верхняя часть геологического разреза переуплотнена относительно вмещающего пространства, а в нижней части, наоборот, возник дефицит масс. В последующее геологическое время этот участок суши опустился и был перекрыт осадочной толщей.

Переуплотненные массы приняли плащеобразную форму залегания и в гравитационном поле создали положительную аномалию. Поскольку переуплотненные массы ближе к дневной поверхности, то они скомпенсировали недостаток масс в нижней части геологического разреза и к тому же создали положительную аномалию, затушевывая тем самым информацию о недостатке масс в нижней части разреза. Но поскольку переуплотненные массы имеют залегание, близкое к горизонтальному, то они при измерениях вертикального градиента силы тяжести практически не проявились, а в то же время проявилось действие разуплотнения в нижней части. Судя по характеру аномалий градиента, область разуплотнения достаточно локализована. Глубина залегания нижней кромки области разуплотнения совпадает в пределах погрешности интерпретации с поверхностью Мохо. Естественно, разуплотнение на

указанных глубинах вряд ли возможно связать с какими-либо другими процессами, кроме вулканической деятельности.

Совершенно противоположную ситуацию мы наблюдаем на Лискинской излучине р. Дон [5]. Здесь отрицательной аномалии силы тяжести соответствует положительная аномалия вертикального градиента. По результатам интерпретации [5] наиболее предпочтительным считается объяснение положительной аномалии вертикального градиента наличием рести-та. Наличие подобных структур в земной коре также связывают с вулканической деятельностью. Причем следует отметить, что Лискинскую аномалию окружают отрицательные аномалии вертикального градиента, которые уместно увязать с зонами выноса материалов.

Помимо того, что мы связываем аномалии вертикального градиента с вулканической деятельностью, мы получаем еще один важный вывод. Время образования зоны разуплотнения, как минимум, можно отнести к протерозою, а может быть, и более раннему времени. Таким образом, можно считать, что процессы вулканической деятельности, происходившие в ранние этапы развития Земли, сохранились и их можно обнаружить с помощью комплексных гравиметрических измерений, хотя на современной поверхности практически нет никаких следов.

С такими же областями разуплотнения мы встречаемся не только на древних платформах, но в альпийских областях складчатости: Крым, Южный Тянь-Шань, Памир и Кавказ. Наверное, главным отличием от древней геологической обстановки надо считать наличие горных систем, которые еще не успели исчезнуть в результате денудации. Поэтому в районах альпийской складчатости соотношение аномалий силы тяжести и ее вертикального градиента выражены более четко.

Остановимся на первых двух названных районах. Поскольку результаты измерений силы тяжести и ее вертикального градиента рассмотрены детально в работах [2–4], прежде всего, обратим внимание на распределение градиента в Крыму. Крым почти во всех исследованиях по изостатическому равновесию приводится в качестве примера, который не соответствует общепринятым правилам гипотезы изостазии. Над Крымом отмечается положительная гравитационная аномалия в редукции Буге. Значения вертикального градиента отрицательны. Следовательно, на глубине имеется разуплотнение и причем значительное. Измерения силы тяжести без вертикального градиента этого разуплотнения не допускают.

В отличие от сочетания силы тяжести и ее градиента в Крыму на Южном Тянь-Шане сталкиваемся еще с другим распределением силы тяжести и градиента: значения силы тяжести и градиента – отрицательные. Кстати, отметим, что измерения вертикального градиента через Главный Кавказский хребет имеют такое же распределение, как и на Южном Тянь-Шане. Чтобы согласовать результаты интерпретации силы тяжести и вертикального градиента между собой, необходимо

было допустить разуплотнение в земной коре на глубине ниже 15 км [1]. Причем объяснить наблюдаемые аномалии градиента как в Крыму, так и на Южном Тянь-Шане существующими схемами поверхности Мохо невозможно. Поэтому автором статьи [2] было высказано утверждение о несостоятельности гипотез изостазии по Пратту и Эри.

Следует признать следующие факты. Гипотеза Эри не может объяснить многих положительных аномалий силы тяжести над горными системами (в качестве примера может служить тот же Крым, Скандинавия и т.д.). Гипотеза Пратта также не укладывается в рамки приведенных в статье сочетаний аномалий силы тяжести и ее вертикального градиента. Граница разуплотнения земной коры на примере Памира может достигать более 200 км и создавать очень крупные отрицательные аномалии силы тяжести, тогда как, по Пратту, граница разуплотнения принимается равной константе, которая у разных авторов варьирует от 60 до 160 км. Кроме того, обе гипотезы никак не предусматривают зон разуплотнения как на платформах, так и в областях горных систем. Если признать существование зон разуплотнения за счет перераспределения масс по вертикали, то мы должны согласиться с тем, что в некотором локальном объеме геологического разреза масса не изменилась. Тогда возникает вопрос, а за счет чего должна прогибаться поверхность Мохо. В связи с этим возникает еще один вопрос, что собой представляет Мохо. Ведь, действительно, под горами граница раздела плотностей имеет прогиб.

Главная геофизическая граница литосферы, выделенная столетие назад, до сих пор не нашла однозначного геологического толкования. Она формально принята за нижнюю границу земной коры при допущении, что первично-кристаллический субстрат имеет основной и ультраосновной перидотитовый и эклогитовый состав, что обуславливает резкую смену сейсмических и плотностных характеристик относительно так называемых гранитного или гранит-метаморфического слоя.

В качестве альтернативы можно предложить, что поверхность Мохоровичича является ничем иным, как границей, возникшей в результате магматических процессов в недрах Земли, происходящих при образовании земной коры. За счет особенностей геологических процессов, их динамики и временных факторов граница эта неоднородна. Не зря при интерпретации геофизических данных выделяют границу Мохо с различной избыточной плотностью на разных участках в одном и том же регионе, выделяют «четкие» и «нечеткие» границы, дополнительные границы и т.д. и т.п.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов, Ю.В. Плотностные неоднородности земной коры / Ю.В. Антонов // Геофизика. – 2005. – № 1. – С. 62–68.
2. Антонов, Ю.В. Изостатическое равновесие в верхней части земной коры / Ю.В. Антонов, В.И. Жаворонкин, С.В. Слюсарев // Геофизика. – 2003. – № 6. – С. 23–28.

3. Антонов, Ю.В. Природа аномалий вертикального градиента силы тяжести над горными сооружениями Южного Тянь-Шаня / Ю.В. Антонов, Е.А. Зубченко, С.В. Слюсарев // Изв. вузов. Сер. Геология и разведка. – 1990. – № 7. – С. 102–106.

4. Антонов, Ю.В. Геологическое истолкование вертикального градиента силы тяжести над горными сооружениями Средней Азии / Ю.В. Антонов, С.В. Слюсарев // Изв. вузов. Сер. Геол. и разведка. – 1994. – № 5. – С. 129–133.

5. Антонов, Ю.В. Лискинская аномалия вертикального градиента силы тяжести / Ю.В. Антонов, В.И. Жаворонкин, С.В. Слюсарев // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. – Воронеж : Изд-во ВГУ. – 2001. – № 11. – С. 204–209.

6. Николаевский, В.Н. Разломы и реологическая расчлененность земной коры / В.Н. Николаевский, В.И. Шаров // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. – 1935. – № 1. – С. 16–28.

7. Страхов, В.Н. К вопросу неоднозначности решения обратной задачи гравиметрии / В.Н. Страхов // Прикладная геофизика. – М. : Недра, 1972. – Вып. 69. – С. 115–139.

8. Халевин, Н.К. К вопросу построения земной коры Урала / Н.К. Халевин // Геофизический журнал. – 1990. – Т. 12. – № 5. – С. 55–59.

9. Шен, Э.Л. Выявление скомпенсированных неоднородностей в разрезе земной коры и верхней мантии / Э.Л. Шен, В.Г. Козленко, Л.И. Койфман // Объемные структуры земной коры и верхней мантии. – Магадан, 1986. – С. 53–62.

УДК 550.832

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СКВАЖИНАХ: ВОПРОСЫ ТЕРМИНОЛОГИИ И КЛАССИФИКАЦИИ

А.А. Аузин

Воронежский государственный университет

Рассматриваются некоторые терминологические проблемы в области геофизических исследований в скважинах (ГИС). Предлагается вариант классификации, в которой группирование методов и методик ГИС на верхнем уровне осуществлено по целевому назначению методов. Более дробное деление выполнено как на основании характеристик геофизических полей, используемых при реализации методов, так и по решаемым ими задачам. Классификация включает в себя не только методы каротажа, но и методы скважинной геофизики.

Геофизические исследования в скважинах (ГИС) составляют основную, наиболее значительную часть методов, относимых к подземной геофизике, которая в свою очередь, наряду с космо-, аэро-, наземной (полевой) и морской геофизикой, представляет собой один из разделов разведочной (прикладной) геофизики (рис. 1). В основу такого деления разведочной геофизики положена физическая среда, в которой проводятся геофизические исследования.

Геофизические исследования в скважинах включают в себя методы каротажа и методы скважинной геофизики. Основными целями каротажа являются определение литологии и корреляция вскрытых скважинами разрезов, выявление и опробование полезных ископаемых, а также исследование технического состояния скважин. Традиционно к методам каротажа относят и некоторые операции в скважинах, в частности – отбор проб, торпедирование и пр. Однако в любом случае исследуется или подвергается воздействию достаточно локальная область пространства – либо сама скважина,

либо непосредственно примыкающий к ее стенкам скважинный участок среды. Таким образом, область исследования методов каротажа соизмерима с той, которую может обеспечить изучение керна¹.

Отличительной особенностью методов скважинной геофизики является то, что они позволяют исследовать весьма значительные объемы околоскважинного пространства (радиус исследования некоторых из них достигает десятков и сотен метров). В этом смысле методы скважинной геофизики близки к таким наземным методам геофизических исследований, как электроразведка, гравиразведка, магниторазведка и пр.

Достаточно важная и до сих пор не урегулированная проблема ГИС лежит в сфере терминологии. Причем имеет место вполне определенное взаимное непонимание между специалистами, работающими в сфере промысловой геофизики, и геофизиками-рудниками. Характерным примером подобных отношений является применение термина «скважинная геофизика», который вопреки ГОСТу, введенному в действие

¹ Термин «*carottage électrique*», по аналогии с «*carottage mécanique*», обозначающим отбор керна или колонковое бурение, был введен для обозначения, предложенного К. Шлюмберже и им же впервые примененного в 1926 г., электрического метода исследований в скважинах, соответствующего методу КС в его современном понимании. Название нового метода, по существу, подчеркивало, что решаемые им задачи аналогичны традиционно решавшимся с помощью изучения керна материала. В дальнейшем, когда сфера применения геофизических исследований в скважинах существенно расширилась и видоизменилась, за рубежом термин «*carottage*» в прежнем его понимании применительно к геофизическим исследованиям в скважинах практически перестал использоваться. Даже во Франции он уступил место термину «*diagraphie*» (в частности, «*diagraphie électrique*» означает электрический каротаж). Однако, среди отечественных специалистов-геофизиков термин «каротаж» сохранил свое значение и широко используется до сих пор.