

## ЛИСКИНСКАЯ АНОМАЛИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Ю.В.Антонов, В.И.Жаворонкин, С.В.Слюсарев, В.Н.Чирков, О.В.Чучелова

*Воронежский государственный университет*

Рассматриваются проблемы интерпретации скомпенсированных плотностных неоднородностей в земной коре. Показано, что их обнаружение и расшифровка возможны с использованием результатов измерения поля вертикального градиента силы тяжести. В качестве иллюстрации анализируются данные о Лискинской аномалии  $V_{zz}$  и приводятся возможные модели ее формирования.

Многолетнее изучение пространственного распределения аномальных полей силы тяжести и ее вертикального градиента в пределах Воронежского кристаллического массива (ВКМ) и его обрамления позволило выявить ряд аномальных объектов различного знака - Россошанскую, Лискинскую, Касторненско-Липецкую и др. аномалии [1-3]. Их анализ в сопоставлении с известными геологическими и геофизическими данными поставил множество проблем, которые ранее замалчивались либо обходились стороной. Основная из них - обнаружение и расшифровка скомпенсированных плотностных неоднородностей в земной коре, которые, несомненно, широко распространены в естественных условиях [4,5]. Подобные неоднородности выявляются при сопоставлении полей силы тяжести и ее вертикального градиента в виде пространственно совмещенных аномалий различного знака. К настоящему времени съемкой установлены все возможные варианты их сочетания. Пониженные значения градиента и максимумы поля силы тяжести зафиксированы над Михайловско-Белгородским и Орловско-Россошанским раннепротерозойскими подвижными поясами, а также в пределах Россошанского нижнеархейского массива. В пределах Лискинской аномалии фиксируется обратное соотношение - интенсивная положительная аномалия  $V_{zz}$  и отрицательная аномалия  $\Delta g$ . Очень интенсивная линейная отрицательная Касторненско-Липецкая аномалия градиента в поле силы тяжести и вовсе не отображается. Этот список можно значительно расширить - всего таких аномальных участков земной коры на территории ВКМ к настоящему времени установлено более десятка.

Как уже отмечалось в ряде статей [1-3], совместное рассмотрение аномалий силы тяжести и ее вертикального градиента резко повышает однозначность геологической интерпретации. Это связано с тем, что сила тяжести и ее вертикальный градиент имеют различные дифференциальные и интегральные характеристики. В качестве иллюстрации рассмотрим аномальное поле от одиночного тела в форме шара. Оно создает поле силы тяжести одного знака, в то время как поле вертикального градиента над ним более сложное и принимает как положительные, так и отрицательные значения. Амплитуда силы тяжести над шаром зависит от его размеров и

значения избыточной плотности. Например, при небольшой избыточной плотности и большом радиусе шара интенсивность аномалии силы тяжести может достигать значительных величин. А для вертикального градиента амплитуда определяется только избыточной плотностью - аномалия вертикального градиента с увеличением размеров шара не меняется. Необходимо также отметить влияние на величину аномалии формы тела. В частности, значение силы тяжести от плоскопараллельного пласта напрямую зависит от его мощности и равно  $2\pi f\sigma H$  ( $f$  - гравитационная постоянная;  $\sigma$  - избыточная плотность;  $H$  - мощность пласта), а аномалия вертикального градиента над ним равна нулю. Таким образом, основное различие заключается в том, что сила тяжести является функцией массы, а вертикальный градиент - функцией плотности.

Несмотря на это среди геофизиков бытует мнение, что в принципе аномалия силы тяжести и аномалия вертикального градиента несут одну и ту же смысловую нагрузку, следует лишь использовать различные способы интерпретации. В результате делается вывод, что нет необходимости измерять вертикальный градиент силы тяжести, достаточно вычислить его с помощью трансформаций, при этом считается, что вычисленные значения  $V_{zz}$  мало отличаются от измеренных. Однако, такое мнение глубоко ошибочно. Сравнение измеренных и вычисленных аналитическим путем значений вертикального градиента [1-3] практически подтверждает ошибочность такого подхода. Покажем это на следующем простом примере.

Допустим, в разрезе существует не одно, а два тела, залегающих друг под другом. Рассмотрим для простоты двумерную задачу. Сверху имеется достаточно широкий горизонтальный пласт небольшой мощности с условной плотностью положительного знака. Ниже расположим цилиндр с отрицательной плотностью. Варьируя глубиной залегания цилиндра, его радиусом и избыточной плотностью можно получить аномалию, близкую по амплитуде к аномалии от пласта. Тогда суммарное поле притяжения будет близким к нулю. В этой ситуации вычисление вертикального градиента с помощью трансформации по интегральному полю  $\Delta g$  также даст аномалию  $V_{zz}$  близкую к нулю. В то же

время при прямых измерениях пласт дает практически нулевую аномалию градиента, кроме локальных аномалий  $V_{zz}$  на боковых гранях, а от нижележащего цилиндра получим отрицательный аномальный эффект, амплитуда которого будет определяться избыточной плотностью тела. Таким образом, измерение вертикального градиента позволяет проводить более однозначную интерпретацию при наличии компенсирующих друг друга плотностных неоднородностей. На практике таких ситуаций чрезвычайно много [4,5] и на одной из них остановимся более подробно.

При проведении региональной съемки вертикального градиента на территории ВКМ в районе г.Лиски были обнаружены аномально высокие значения  $V_{zz}$ . Для установления их природы были проведены детализационные работы, заключающиеся в сгущении сети наблюдений. Они позволили оконтурить крупную аномалию, названную Лискинской.

Лискинская аномалия вертикального градиента силы тяжести зафиксирована более чем в 30 пунктах наблюдения, причем измерения выполнены разными приборами, в разные годы и разными операторами, что исключает наличие какого-либо субъективного фактора. Аномалия протяженностью более 50 км имеет северо-западную ориентировку и по интенсивности превышает 300 Е (рис.1). Заметим, что конфигурация аномалии достаточно условна, так как съемка выполнена по сети в среднем 7x7 км.

Территориально аномалия  $V_{zz}$  совпадает с областью пониженных значений поля силы тяжести, причем степень корреляции этих полей очень высокая (рис.2). Последнее, в частности, подчеркивается тем, что область "пережима" аномалии градиента в районе устья р. Хворостань отвечает локальному повышению гравитационного поля. Интенсивность остаточной аномалии силы тяжести составляет порядка 4 мГал. Если интерпретировать только аномалию силы тяжести, то исходя из петроплотностной характеристики горных пород данного участка (которая детально будет рассмотрена ниже), можно предположить, что верхняя часть разреза представлена породами пониженной плотности ( $\sim 0,04 \text{ г/см}^3$ ) мощностью до 4 км.

Магнитное поле в пределах контура аномалии (рис.3) имеет сложнодифференцированный накоперемный характер. В районе г.Лиски выделяется область положительных значений поля, обусловленная Лискинским массивом гранитов. Северо-западная периферия аномальной зоны характеризуется системой разноориентированных линейных аномалий незначительной интенсивности, фиксируемых на общем отрицательном фоне. Последнее свидетельствует о наличии на данном участке земной коры так называемого "тектонического узла" - зоны пересечения разноориентированных разломов. На подобных участках земной коры наиболее активно проявлены тектонические, магматические процессы и процессы метаморфизма, в результате на площади подобных узловых зон и сопредельных территориях наблюдается аномально высокая

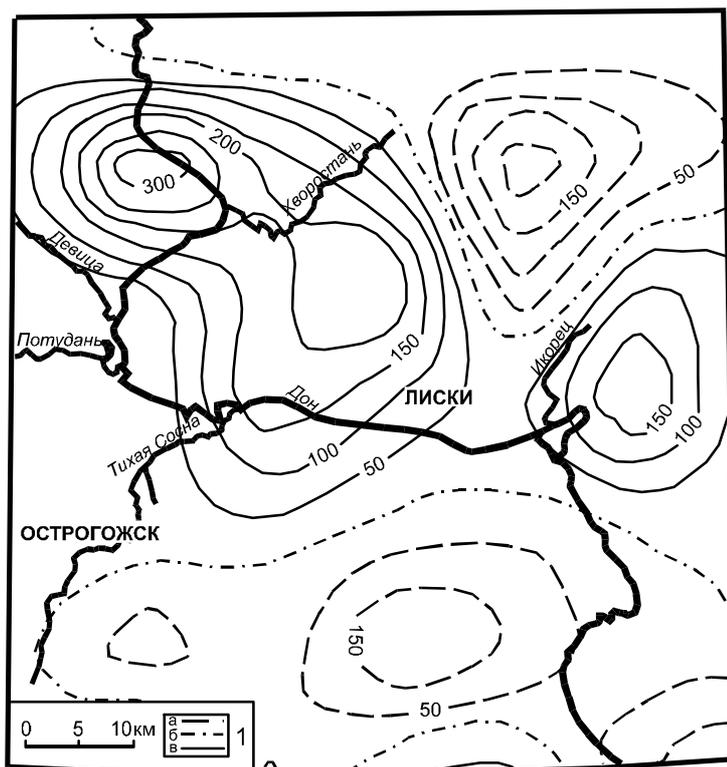


Рис.1. Карта аномального поля вертикального градиента силы тяжести: 1 — изолинии  $V_{zz}$  (значение поля в этвешах) — а - положительные, б - нулевые, в - отрицательные.

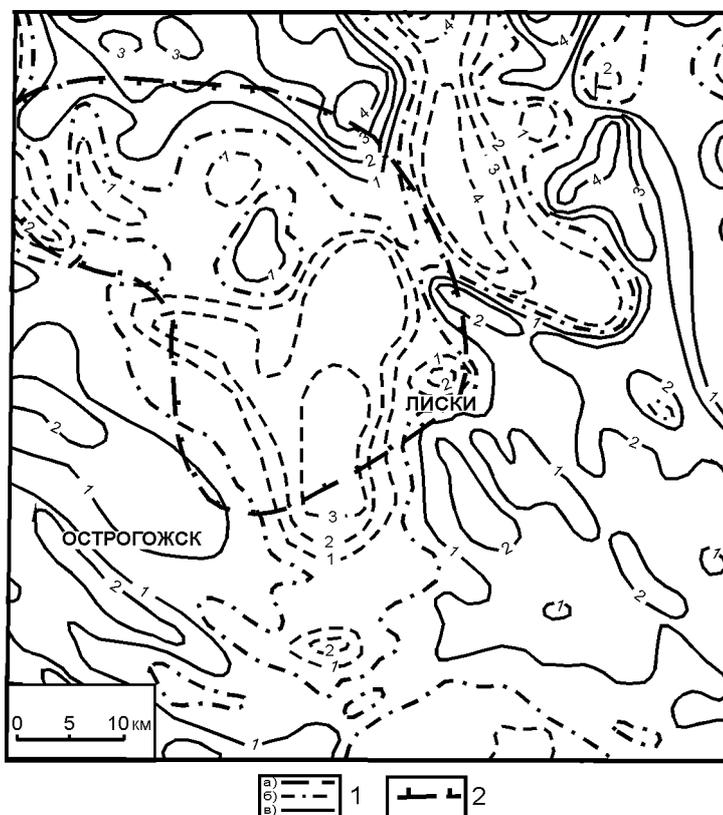


Рис.2. Карта остаточных аномалий силы тяжести: 1 — изолинии  $\Delta g$  (а - положительные, б - нулевые, в - отрицательные); 2 — контур Лискинской аномалии вертикального градиента силы тяжести.

структурно-вещественная неоднородность [6].

На рис.4 дана петроплотностная характеристика пород, выходящих в срез кристаллического фундамента. Данные заимствованы со "Схематической петроплотностной карты докембрия КМА" (Н.С.Афанасьев, Р.А.Орлов, Т.Ф.Филаретова, 1989) с учетом последующих изменений, внесенных Н.С.Афанасьевым. Достаточно очевидно, что наблюдается тесная связь между этим физическим параметром и наблюдаемым полем силы тяжести. Обширной зоне пониженных его значений отвечает блок земной коры с приповерхностной плотностью  $2,69 \text{ г/см}^3$ . В пределах смежных блоков она составляет  $2,72-2,73 \text{ г/см}^3$ . Таким образом, распределение избыточных плотностей полностью согласуется с полем силы тяжести. Отметим еще и то, что в пределах контура аномалии градиента бурением вскрыты магматиты плотностью до  $2,85 \text{ г/см}^3$ , которые в магнитном и гравитационном полях отражаются локальными положительными аномалиями (см. рис. 2,3).

В структурном плане Лискинская аномалия приурочена к центральной части Лосевской шовной зоны<sup>1</sup>. Причем,

ее северная периферия находится в пределах Лосевской рифтогенной зоны, представленной структурно-формационным комплексом позднего рифтогенеза ( $AR_2 \div PR_1$ ) (базальт-риолитовая формация лосевской серии, рис.5). Южная часть контура аномалии охватывает область развития раннеархейского структурно-формационного комплекса ( $AR_1$ ) этапа формирования базит гранулитового основания (донская ассоциация обоянского комплекса). В непосредственной близости от аномальной зоны находится узел пересечения нескольких разломов, два из которых - Суджанско-Икорецкий и Графский, относятся к сквозным, коромантийным. В пределах аномального объекта широко представлены гранитоиды различного типа. В северной части это плагιοграниты усманского комплекса, в южной субщелочные граниты лискинского комплекса, крупнейший из которых Лискинский, а также граниты и граносиениты павловского комплекса. В северной части выявлен ряд мелких интрузий базит-гипербазитов рождественского комплекса. Южнее, в области развития раннеархейского структурно-формационного комплекса, судя по имеющемуся картографическому материалу (рис.5), представлены амфиболиты михайловской серии, относимые авторами использованной карты к позднеархейскому структурно-формационному комплексу ( $AR_2$ ) этапа рифтогенеза (формирования зеленокаменных поясов). По всей видимости, рассматриваемый участок земной коры активен на неотектоническом этапе, о

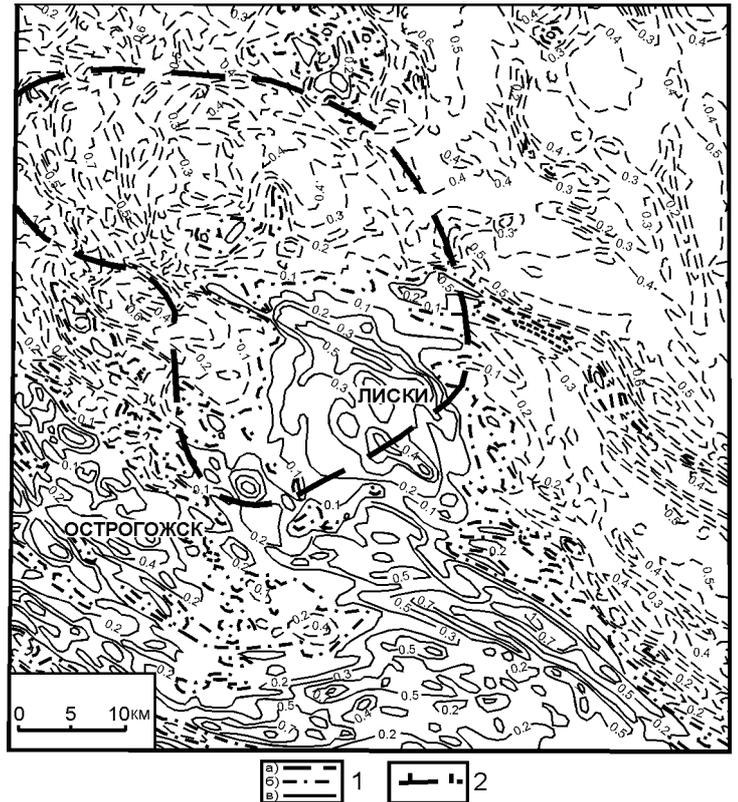
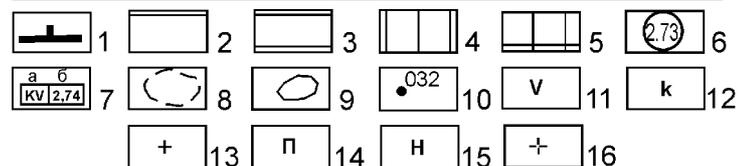
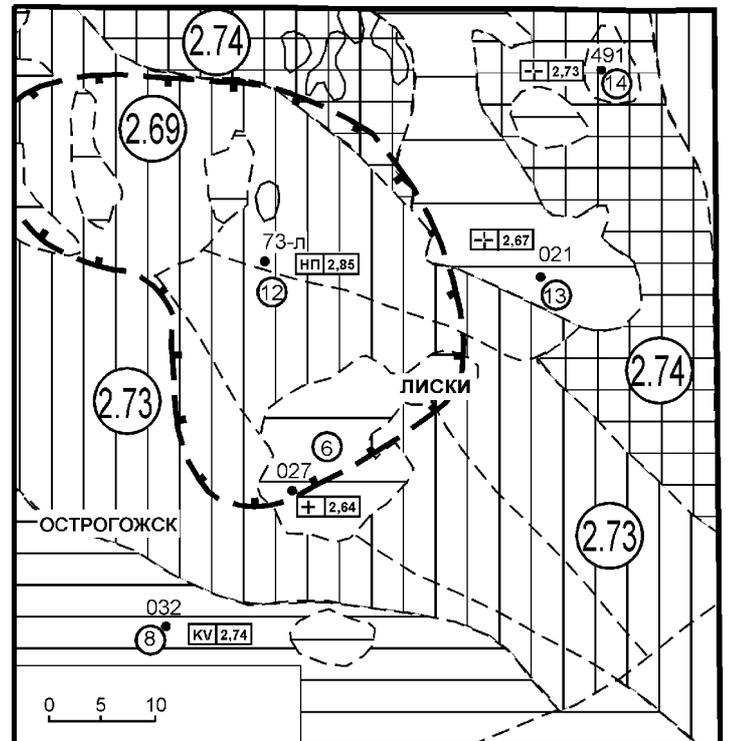


Рис. 3. Карта магнитного поля ( $\Delta Z$ ): 1 — изолинии  $\Delta Z$  (а - положительные, б - нулевые, в - отрицательные); 2 — контур Лискинской аномалии вертикального градиента силы тяжести.



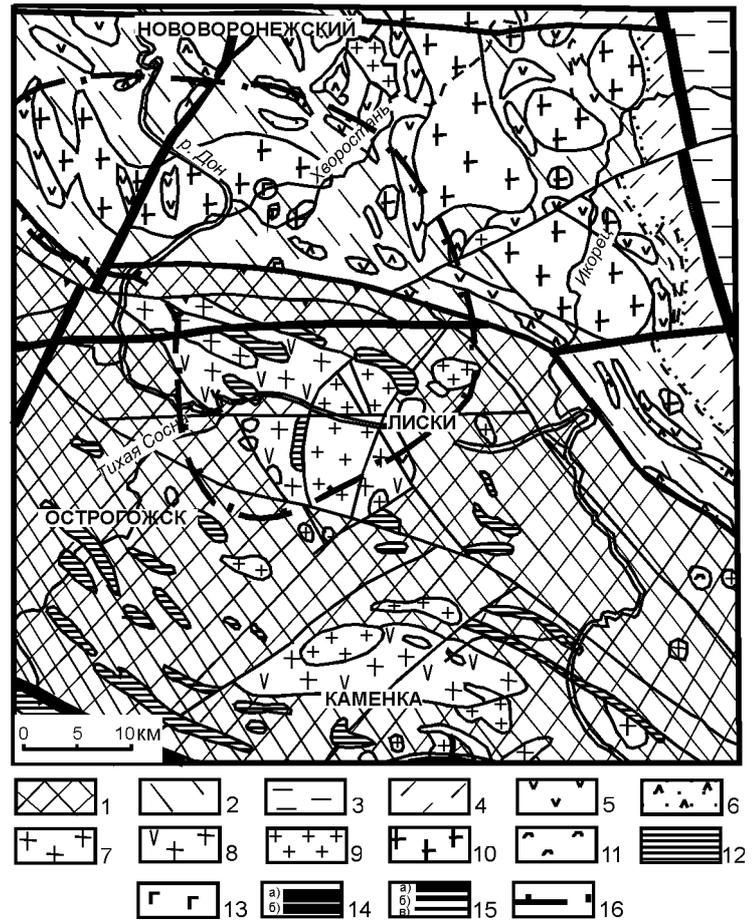
<sup>1</sup> Структурно-геологическая характеристика объекта дана в соответствии с "Тектонической картой Воронежского кристаллического массива" (Ред. Б.М.Демченко, Н.И.Сычкин, Н.М.Чернышов, 1997) и "Геологической картой Воронежского кристаллического массива" (Ред. Б.М.Демченко, Б.М.Петров, Н.И.Сычкин, Н.М.Чернышов, 1999).

**Рис. 4** Схематическая петроплотностная карта кристаллического фундамента (по Н.С. Афанасьеву и др., 1989): 1 — контуры Лискинской аномалии  $V_{zz}$ ; 2—5 петроплотностная характеристика структурно-формационных комплексов и блоков докембрия ( $\text{г/см}^3$ ) (2 — 2.62-2.66, 3 — 2.66-2.70, 4 — 2.70-2.74, 5 — 2.74-2.78); 6 — значение плотности блока, интрузива; 7 — петрофизическая характеристика массивов и проявлений (дайки, жилы) пород основного, ультраосновного, кислого составов и участков рудной минерализации по отдельным скважинам или группе скважин (а — основные петрофизические разновидности, б — средняя плотность в  $\text{г/см}^3$ ); 8 — границы структурно-формационных комплексов, блоков, массивов; 9 — границы интрузий основного, ультраосновного состава по геофизическим данным; 10 — пробуренные скважины, их номера; 11—16 основные типы горных пород (11 — метаэффузивы михайловской серии; 12 — волоконовский комплекс, карбонатиты, апатит-магнетитовые породы, карбонатно-сланцевые породы; 13 — атаманский комплекс, граниты субщелочные, пегматиты, аплиты; 14 — перидотиты рождественского комплекса; 15 — перидотиты стойло-николаевского комплекса; 16 — усманский комплекс, плагиограниты, гранодиориты).

чем свидетельствует резкое изменение направления русла р.Дон с меридианального на широтное.

Анализ рассмотренных материалов показывает, что Лискинская аномалия вертикального градиента находится в явном противоречии с полем силы тяжести и данными петроплотностного районирования, а так же с геологическим строением верхней части кристаллического фундамента. Если изложенная выше информация объективна то из нее следует вывод о том, что мы имеем дело с компенсирующими друг друга плотностными неоднородностями, то есть с ситуацией близкой к рассмотренной выше теоретически. В результате мы должны предположить, что под гранитным массивом в средней части земной коры существует крупная плотностная неоднородность положительного знака. Гранитизированные породы верхней части геологического разреза, имеющие отрицательную избыточную плотность по отношению к окружающему геоматериалу полностью компенсируют притяжение нижних масс с положительной избыточной плотностью. Следовательно, наблюдаемая отрицательная аномалия поля силы тяжести частично компенсируется притяжением нижележащих масс с положительной избыточной плотностью. В результате поле, созданное приповерхностными разуплотненными породами, в значительной степени ослаблено. Предельная оценка показывает, что мощность зоны разуплотнения должна составлять не менее 8 км.

Природа среднекоровых избыточных масс положительного знака, создающих Лискинскую аномалию градиента, на данном этапе исследований без проведения детальной съемки  $V_{zz}$  по интерпретационным профилям однозначно не может быть установлена. Мы вправе лишь очертить возможный круг моделей, используя рассмотренные выше геолого-геофизические данные. По нашему мнению возможны по крайней мере три варианта формирования пространственно совмещенных плотностных неоднородностей - разуплотнения в верхней срезовой части консолидированной коры и наличия под ним объекта повышенной плотности.



**Рис.5.** Геологическая карта докембрия (по "Геологической карте Воронежского кристаллического массива" ред. Б.М. Демченко, Б.М. Петров, Н.И. Сычкин, Н.М. Чернышев, 1999): 1 — обоянский комплекс, донская породная ассоциация (гранодиорито-гнейсы биотит-амфиболовые, амфиболиты, граносиенито-гнейсы, породы интенсивно мигматизированы); 2 — лосевская серия, верхняя толща (метадуниты, метабазальты, метатупофосчаники); 3 — воронцовская серия, нижняя толща (ритмично переслаивающиеся метапесчаники с прослоями сланцев, на участках глубокого метаморфизма породы серии превращены в гнейсы); 4 — воронезская свита (метаэффузивы основного и среднего состава, метабазальты, метаандезитобазальты, метаандезиты, метатупофобрекчи, метатупофогравилиты, метатупофиты, метапесчаники); 5 — лосевская серия, нижняя толща (метабазальты, амфиболиты, ортосланцы основного и среднего состава); 6 — лосевская серия, нижняя толща (риолиты и риодациты); 7 — павловский комплекс, первая фаза (граниты и граносиениты порфиروبластические известково-щелочные, биотитовые, биотит-роговообманковые); 8 — граниты, граносиениты, сиениты павловского комплекса; 9 — лискинский комплекс (граниты субщелочные лейкократовые, часто порфиroidные, двуполевошпатовые, биотитовые, калиевонатриевые до калиевых); 10 — усманский комплекс (плагиограниты биотитовые, роговообманково-биотитовые; граниты биотитовые); 11 — мамонский комплекс, первая фаза (пироксениты); 12 — михайловская серия (амфиболиты, гранат-биотит-роговообманковые гнейсы, изредка маломощные прослои магнетит-амфиболовых пород); 13 — рождественский комплекс (габбро-роговообманковые, габбронориты, габбро-амфиболиты, пироксениты оливиновые, вебстериты).

1. Рассматриваемый участок земной коры в пределах контура аномалии изначально был более плотным, но при последующих тектономагматических активизациях верхняя его часть была

разуплотнена структурно или вещественно, в нашем случае в результате насыщения гранитоидами.

2. В средней части коры на данном участке можно предположить существование крупного массива ультраосновных пород. Об этом могут свидетельствовать мелкие массивы гипербазитов в срезе докембрия, установленные по геофизическим данным и подтвержденные бурением.

3. Наиболее вероятной представляется модель формирования плотностных неоднородностей в результате становления гранитоидных интрузий, представленных лискинским либо усманским комплексами. Учитывая, что объект повышенной плотности фиксируется на уровне средней коры, можно предположить, что он представляет собой рестит, сформировавшийся в области магмагенерации за счет плотностной дифференциации исходного субстрата. Его положительную избыточную плотность можно объяснить значительной насыщенностью пород подвергшихся плавке амфиболитами михайловской серии, которые в значительном объеме фиксируются на рассматриваемом участке коры и обладают повышенной плотностью.

*Работы выполнены при поддержке гранта РФФИ 99-05-65015.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов Ю.В., Жаворонкин В.И., Слюсарев С.В. Новые возможности гравиметрии в изучении геологического строения земной коры // Геофизика. -1999. -№ 3. -С.47-52.
2. Антонов Ю.В., Жаворонкин В.И., Слюсарев С.В., Чирков В.Н., Чучелова О.В. Карта вертикального градиента силы тяжести юго-восточной части ВКМ // Вестн. Воронежского университета. Сер. геол. -1999. -Вып.8. -С. 162-167.
3. Антонов Ю.В., Жаворонкин В.И., Слюсарев С.В., Чучелова О.В. Совместная интерпретация аномалий силы тяжести и ее вертикального градиента при изучении юго-восточной части Воронежского массива // Вестн. Воронеж. ун-та. Геология. -2000. -№5(10). -С.183-187.
4. Халевин Н.И. К вопросу построения модели земной коры Урала // Геофизический журнал. -1990. -Т.12, №5. -С.55-59.
5. Шен Э.Л., Козленко В.Г., Койфман Л.И. Выявление скомпенсированных неоднородностей в разрезе земной коры и верхней мантии // Объемные структуры земной коры и верхней мантии. -Магадан, 1986. -С.53-62.
6. Жаворонкин В.И., Бочаров В.Л., Серебряков Е.Б. Роль разломов в формировании эндогенного оруденения на территории Воронежского кристаллического массива // Изв. вузов. Геол. и разведка. -1989. -№10. -С. 24-29.