

Ю. В. АНТОНОВ

ИЗМЕРЕННЫЕ И ВЫЧИСЛЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ И ЕЕ ПРОИЗВОДНЫХ

Проанализированы измеренные и вычисленные с помощью трансформант значения силы тяжести и ее производных. Подтвержден вывод о том, что при трансформациях теряется определенная часть (иногда существенная) геофизической информации. Трансформанты можно использовать преимущественно для качественной интерпретации. Установлено увеличение геологической эффективности гравиметрии при одновременном измерении силы тяжести и ее производных.

На стадии становления гравиметрического метода исследований в геолого-разведочном деле измерялись преимущественно вторые производные потенциала силы тяжести с помощью вариометров Этвеша. Хотя последние не позволяли измерять полный тензор вторых производных, но тех производных, которые измерялись, было вполне достаточно для эффективного использования при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых. Практически единственным недостатком вариометров Этвеша являлась низкая производительность при проведении полевых работ. Поэтому появление гравиметров, измеряющих относительные приращения силы тяжести, а также быстрое повышение точности измерений таких гравиметров практически сразу же склонили чашу весов в пользу гравиметров. И даже запоздавшие на смену вариометрам горизонтальные градиентометры, у которых время на одно измерение было < 10 мин, не смогли переломить общую тенденцию к переходу от измерений вторых производных силы тяжести к измерению самой силы тяжести.

Сведений о совместных измерениях силы тяжести и ее производных было очень мало, хотя это дает весомую геологическую эффективность при интерпретации гравиметрических данных [1, 2]. К сожалению, экономическая эффективность превалировала над геологической, и комплексные измерения силы тяжести и ее производных не производились. Совместные измерения проводились лишь на первом этапе внедрения гравиметров на каком-либо известном рудном объекте с целью показать, что рудное тело с помощью измерений силы тяжести выделяется достоверно, как и в измерениях производных. Более тщательно аномалии силы тяжести и ее производные не анализировались, и такой анализ не планировался.

Кроме того, в силу предположения в совместных измерениях силы тяжести и ее производных нет необходимости, так как (исходя из теории потенциала) по измеренным значениям силы тяжести на поверхности наблюдения с помощью трансформаций всегда можно вычислить любую производную. Как показали совместные измерения силы тяжести и ее градиентов, вычисленные значения производных не соответствуют измеренным.

Первая причина такого несоответствия достаточно проста. Измеренные значения силы тяжести на поверхности заданы дискретно. Дискретность задания исходных данных является фильтром для высоких частот. Никакими аппроксимациями в силу теоремы Котельникова высокие частоты в вычисленных производных восстановить нельзя [7]. Поэтому последние лишь по форме напоминают измеренные производные, отличаясь по амплитуде иногда в несколько раз (в зависимости от сложности наблюдаемого поля силы тяжести).

Второй причиной может служить размерность аномалий силы тяжести и ее вертикального градиента. Сила тяжести зависит от двух параметров (размера тела и избыточной плотности), а вертикальный градиент — только от плотности. Например, интрузия, имеющая достаточные размеры и небольшую избыточную плотность, может отражаться значительной аномалией в поле силы тяжести и обладать аномалией градиента на уровне погрешности измерений.

Третья причина: различные зависимости аномалий силы тяжести и ее вертикального градиента от формы притягивающих тел. Например, над широким аномальным телом сила тяжести в эпицентре максимальна, а вертикальный градиент относительно минимален. В предельном случае притяжение пласта прямо пропорционально мощности пласта, а аномалия градиента от пласта равна 0.

Четвертой причиной может служить взаимная компенсация притяжений от геологических неоднородностей, имеющих избыточные плотности противоположных знаков: если два тела расположены одно над другим с избыточными плотностями разных знаков. Какая-то часть масс верхнего тела компенсируется определенными массами нижнего, их суммарное притяжение равно на поверхности наблюдения 0. Для простоты допустим, что нижнее тело скомпенсировано полностью частью масс верхнего тела. Тогда оставшаяся часть масс верхнего тела создает поле, эквивалентное полю от двух тел и не отражающее реальное распределение масс. Возможно, для вертикального градиента оставшиеся некомпенсированные массы будут другими. Не исключено, что взаимная компенсация для вертикального градиента будет подчиняться иным правилам, ведь мы рассматриваем проблему вне рамок звездных тел.

Видимо, есть и другие причины. Тщательный анализ силы тяжести и градиента показал, что измеренные производные часто не только качественно, но и количественно не соответствуют вычисленным производным по распределению силы тяжести. Для подтверждения приведем примеры, где имеются одновременно измеренные и вычисленные значения некоторых элементов гравитационного поля.

Начнем с вертикального градиента силы тяжести. Вертикальный градиент достаточно широко используется при редуцировании измеренных значений силы тяжести. Он с помощью вариометров и градиентометров не измеряется, так как на механическом принципе невозможно создать вертикальный градиентометр, несмотря на всю простоту измерительных схем. С созданием высокоточных микрогальных гравиметров появилась возможность измерения вертикального градиента с помощью измерения силы тяжести на двух высотах.

Начнем с того, что вертикальный градиент измеряется гравиметром на высоте 0,7–0,9 м, как у коромысел вариометров Этвеша, поэтому дальнейшее сопоставление измерений вертикального градиента гравиметром и измерений горизонтального градиента вариометром будет адекватным. Для Земли в целом теоретически вычислено среднее значение вертикального градиента — 3086 Е, оно изменяется от полюса к экватору в пределах 6 Е. Измерения вертикального градиента в Средней Азии, Крыму, на Кавказе и Русской платформе [1–3], а также на всей территории Воронежского кристаллического массива в масштабе 1:1 000 000 показали, что среднее значение градиента для всех указанных территорий отличается не более чем на 5 Е от нормального значения. Так что в масштабе Земли никаких противоречий между измеренными и теоретическими значениями вертикального градиента нет.

На рис. 1 приведены измерения магнитного поля Z_a , поля силы тяжести Δg и вертикального градиента силы тяжести V_{zz} над пластами железистых кварцитов. Профиль расположен в районе г. Щигры на Тим-Ястребовской железорудной полосе КМА. Железистые кварциты, преимущественно магнетитовые, залегают в виде крутопадающих пластов в кристаллическом фундаменте протерозойского возраста, представленного кристаллическими сланцами, мигматитами, гранитами, амфиболитами и др. Сверху фундамент перекрыт осадочными отложениями мезозойского возраста мощностью от 100 до 200 м. Осадочные породы залегают горизонтально и существенного влияния на гравитационное поле не оказывают. В магнитном поле железистые кварциты отмечаются интенсивной магнитной аномалией (>120 тыс. нТл) с очень большими горизонтальными и вертикальными градиентами. Поэтому два пласта железистых кварцитов отмечаются общей аномалией. Находящиеся рядом с ними пласты амфиболитов практически не фиксируются из-за больших градиентов в магнитном поле. Только измерения модуля полного вектора магнитной напряженности и его градиентов [1] с последующим вычислением T_a могут в какой-то мере детализировать геологический раз-

рез. Рассматриваемый участок детально разбурен и закартирован.

Здесь проведена съемка силы тяжести с шагом 100 м и погрешностью измерений порядка $\pm 0,04$ мГал. В гравитационном поле Δg два пласта железистых кварцитов, как и в магнитном поле, выделились одной аномалией с амплитудой около 2 мГал. Судя по результатам измерений, кривая вертикального градиента силы тяжести V_{zz} более дифференцирована, чем кривые Δg , Z_a и T_a , и детально расчленяет геологический разрез. Обращает на себя внимание более высокая эффективность расчленения геологического разреза по данным V_{zz} по сравнению с Z_a , хотя это противоречит формуле Пуассона, связывающей магнитный и гравитационный потенциалы. Очевидно, это объясняется тем, что намагничивание железистых кварцитов по отношению к таковому вмещающих пород (например, к амфиболитам, которые по намагнитченности уступают только железистым кварцитам) больше в 20–50 раз. В то же время по избыточной плотности железистые кварциты превышают амфиболиты в 2–3 раза. В этом случае магнитные локальные аномалии небольшой интенсивности на фоне интенсивной магнитной аномалии с большими градиентами практически не проявляются.

Что касается кривых вычисленных значений вертикального градиента, то они по форме напоминают аномалию Δg , кроме того, являются как бы сглаженными значениями наблюдаемой кривой V_{zz} . Таким образом, разница между вычисленными и измеренными значениями вертикального градиента очевидна.

Достаточно любопытны измерения производных на территории КМА, проведенные еще в 1947–1956 гг. с помощью вариометров. Тогда основными геофизическими методами при изуче-

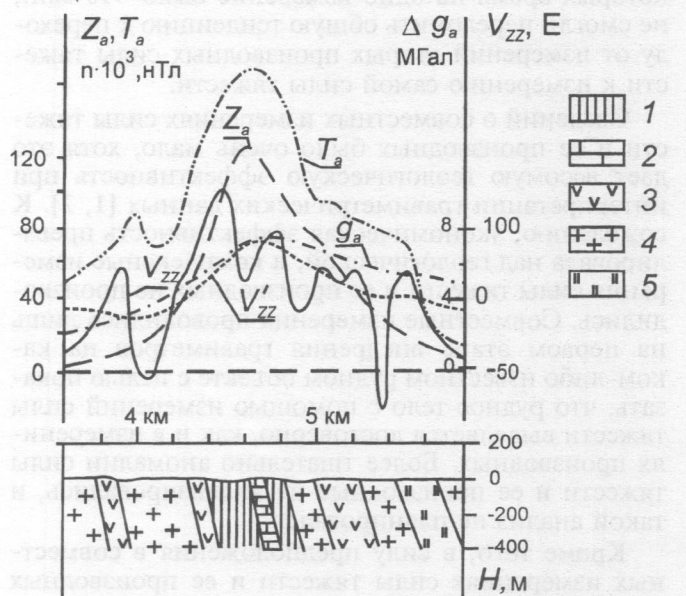


Рис. 1. Сравнение вычисленных (V'_{zz}) и измеренных (V_{zz}) значений вертикального градиента силы тяжести над пластами железистых кварцитов КМА: 1 — железистые кварциты; 2 — карбонаты; 3 — амфиболиты; 4 — граниты; 5 — сланцы; Z_a — измеренные значения вертикальной составляющей магнитного поля; T_a — вычисленные значения аномального модуля напряженности магнитного поля; g_a — аномальные значения силы тяжести

нии железистых кварцитов служили магниторазведка и вариометрия. Поскольку целью геофизических работ являлись поиски железистых кварцитов, то измерения ограничивались в основном полосами, прилегающими к железистым кварцитам. Измерялись производные V_{xz} , V_{yz} , V_{xy} и V_{Δ} , а использовались преимущественно первые две, которые имели наиболее простую физическую и геологическую интерпретацию. По производным вычислялся горизонтальный вектор и строилась карта векторов. При интерпретации определялись следующие физические и геометрические параметры: ширина пласта, глубина залегания верхней кромки, угол падения и избыточная плотность. Других требований тогда к вариометрии не предъявлялось. Естественно, при отсутствии прямых измерений силы тяжести необходимы были значения силы тяжести, которые получали интегрированием горизонтальных градиентов силы тяжести.

Для некоторых участков удалось отыскать измеренные значения производных и вычисленные значения силы тяжести [6], а потом сравнить их с измеренными автором значениями силы тяжести и вычисленными значениями производных (рис. 2). Анализируемый профиль расположен в зоне Михайловской железорудной полосы. Шаг вариометрической съемки равен 100 м, шаг гравиметрической — 250 м, точность измерений соответственно ± 5 Е и $\pm 0,10$ мГал. Геологическая ситуация очень простая: железистые кварциты представлены крутопадающим пластом, глубина залегания верхней кромки около 70 м. На рис. 2 вычисленные аномалии силы тяжести по измерениям горизонтальных производных по амплитуде примерно на 1/4 меньше измеренных значений. Причем вычисленные значения горизонтальной производной по анома-

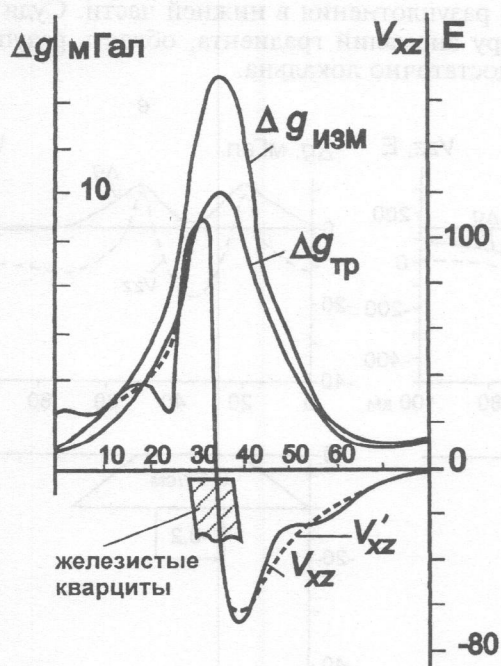


Рис. 2. Сравнение вычисленных ($\Delta g_{тр}$) и измеренных значений силы тяжести ($\Delta g_{изм}$) и вычисленных (V_{xz}) и измеренных значений (V'_{xz}) горизонтального градиента над пластом железистых кварцитов КМА

лиям силы тяжести почти совпадают с измеренными производными, имея чуть меньшую амплитуду в зоне максимальных значений. На рис. 2 из-за масштаба эта разница не отражена. Удивительно это потому, что шаг измерений силы тяжести 250 м, а производных 100 м. Единственным объяснением может служить то, что мы имеем дело с очень простым полем. Но в то же время, как отмечено выше, вычисленные значения силы тяжести по распределению производных намного меньше измеренных. Такой результат вступает в противо-

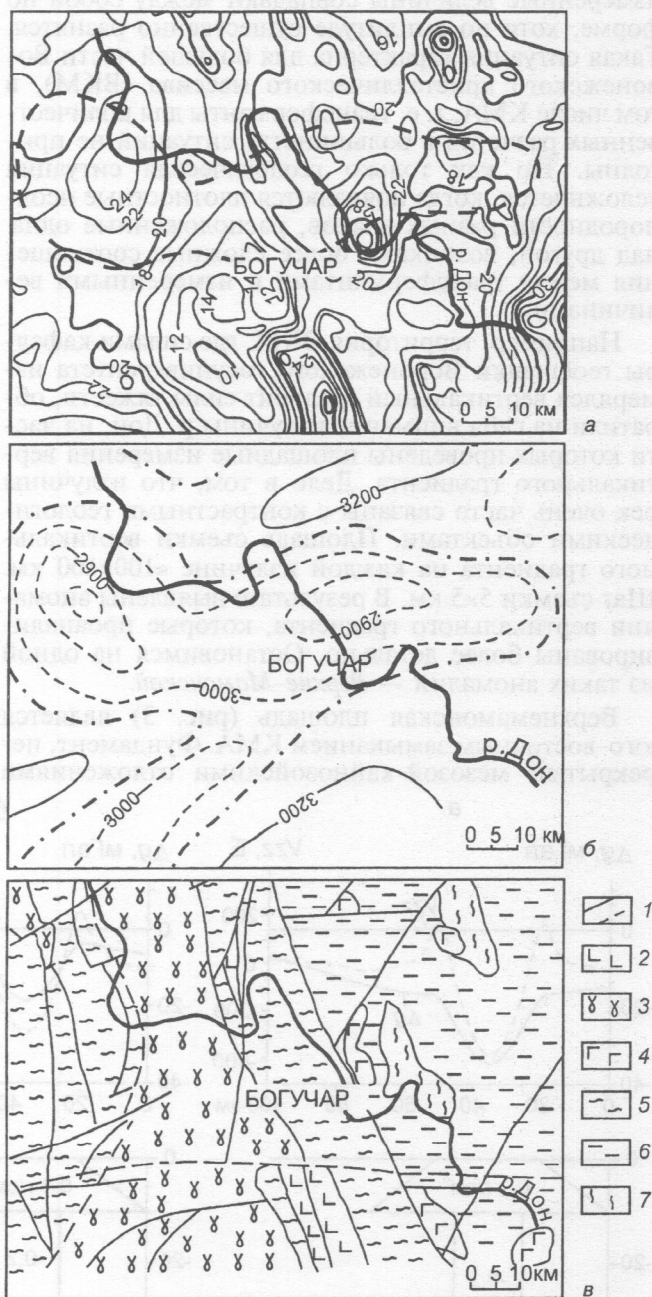


Рис. 3. Схематические карты Верхнеамонской площади: силы тяжести (а), вертикального градиента (б); штрих-пунктиром обозначена изолиния, равная стандартному значению 3086 Е, геологическая (в): 1 — установленные и предполагаемые разломы (границы); 2 — гранитоиды осколецкого комплекса; 3 — граносиениты; 4 — граниты усманского комплекса; 5 — обоянский комплекс, плагиогнейсы; 6 — михайловская серия; 7 — воронежская свита

речие со сложившимся мнением, что интегральные формулы трансформации дают более надежные результаты, чем дифференциальные формулы.

Нами рассмотрены простейшие примеры соотношения между вычисленными и измеренными значениями в профильном варианте. Геологическая ситуация в рассмотренных выше случаях близка к двумерной. Пласты железистых кварцитов при ширине < 1 км имеют протяженность несколько десятков километров, а их избыточная плотность $\approx 0,5$ г/см³. В целом трансформанты и измеренные величины совпадают между собой по форме, хотя по амплитуде существенно разнятся. Такая ситуация характерна для большей части Воронежского кристаллического массива (ВКМ), в том числе КМА, т. е. трансформанты для количественных расчетов в большинстве ситуаций не пригодны. Но как только геологическая ситуация усложняется, когда появляются плотностные неоднородности разных знаков, расположенные одна над другой, возникают более сложные соотношения между трансформантами и измеренными величинами.

Например, территория ВКМ, где силами кафедры геофизики Воронежского госуниверситета измерялся вертикальный градиент силы тяжести, обратили на себя внимание излучины р. Дон, на части которых проведены площадные измерения вертикального градиента. Дело в том, что излучины рек очень часто связаны с контрастными геологическими объектами. Площадь съемки вертикального градиента на каждой излучине $\approx 100 \times 100$ км. Шаг съемки 5×5 км. В результате выявлены аномалии вертикального градиента, которые проанализированы более детально. Остановимся на одной из таких аномалий — *Верхне-Мамонской*.

Верхнемамонская площадь (рис. 3) является юго-восточным замыканием КМА. Фундамент, перекрытый мезозой-кайнозойскими отложениями

мощностью до 200 м, представлен гранодиорито-нейсами, амфиболитами, частично железистыми кварцитами и другими породами и имеет четкое северо-западное простирание, как и все структуры КМА. В гравитационном поле данной площади соответствуют повышенные значения силы тяжести. Эта площадь — *Россошанский массив*. Магнитное поле практически повторяет простирание гравитационного и характеризуется множеством локальных аномалий небольшой интенсивности.

Иной характер имеет поле вертикального градиента силы тяжести. Простирание аномалий градиента ортогонально простиранию магнитного и гравитационного полей. Объясняется это тем, что в допротерозойское время (в протерозое сформированы основные структуры КМА) произошел перенос масс из нижних частей земной коры в верхние или на поверхность Земли. Верхняя часть геологического разреза переуплотнилась относительно вмещающего пространства, а в нижней наоборот возник дефицит масс. В последующее геологическое время этот участок суши опустился и был перекрыт осадочной толщей.

Переуплотненные массы приняли плащеобразную форму и в гравитационном поле создали положительную аномалию. Поскольку переуплотненные массы находятся близко к дневной поверхности, они скомпенсировали недостаток масс в нижней части геологического разреза и создали положительную аномалию, затушевав тем самым информацию о недостатке масс в нижней части разреза. Но поскольку переуплотненные массы залегают почти горизонтально, то они при измерениях вертикального градиента силы тяжести практически не проявились, в то же время проявилось действие разуплотнения в нижней части. Судя по характеру аномалий градиента, область разуплотнения достаточно локальна.

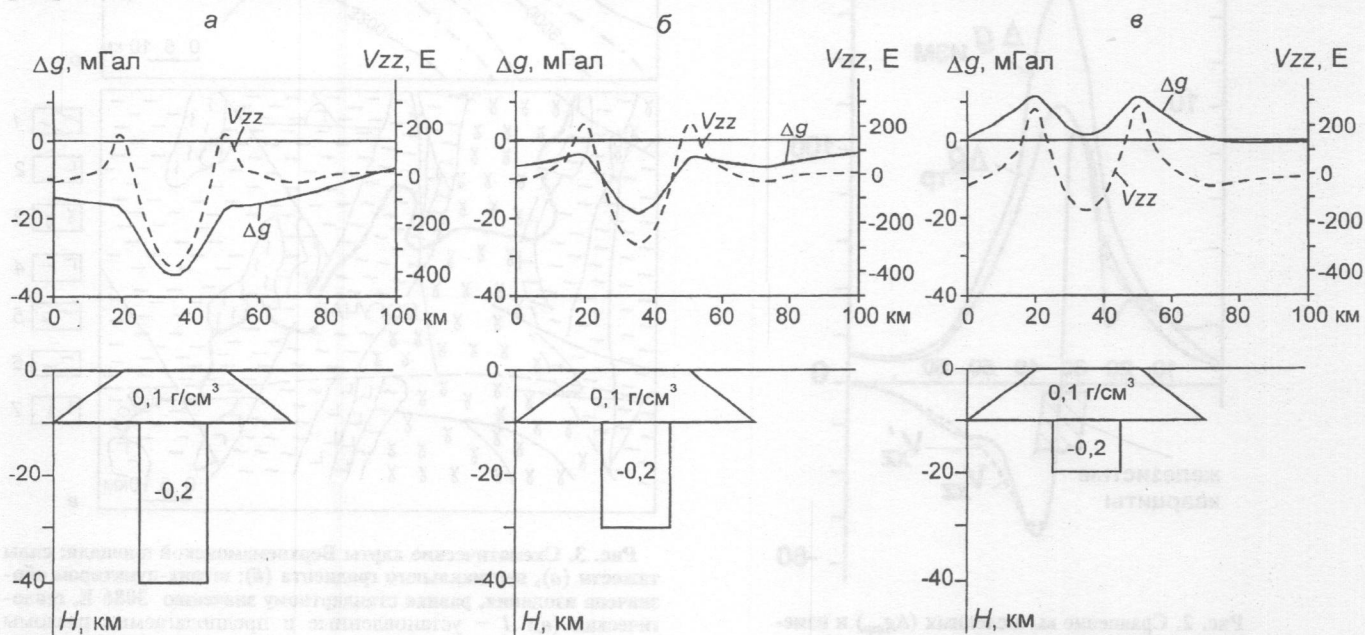


Рис. 4. Расчеты аномалий силы тяжести и ее вертикального градиента над зонами с компенсирующимися неоднородностями: а — масса области разуплотнения в два раза больше масс области переуплотнения; б — массы областей разуплотнения и переуплотнения равны; в — масса области разуплотнения в два раза меньше масс области переуплотнения

Моделирование показывает, что подобное соотношение между аномалиями силы тяжести и ее вертикальным градиентом, которое наблюдается на Верхнемамонской аномалии, возможно при наличии плотностных неоднородностей различных знаков. Возьмем две призмы (рис. 4). Меняя параметры только нижней призмы, при мало изменяющейся аномалии градиента получаем амплитуду силы тяжести от отрицательных до положительных значений. Подчеркнем, что рассматриваемые модели показывают принципиальную возможность существования различных соотношений между Δg и V_z . Это подтверждают практические измерения [5]. В заключении обратим внимание на одну особенность: форму аномалий при наличии плотностных неоднородностей разного знака. Эти аномалии в нефтяной геофизике принято называть аномалиями типа «сомбреро».

1. Совместное использование измерений силы тяжести и ее вертикального градиента позволяет в значительной степени повысить геологическую информативность гравиметрии при изучении земной коры. В частности, обнаружить скомпенсированные неоднородности в геологическом разрезе и тем самым уменьшить влияние эквивалентности при интерпретации гравиметрических данных.

2. Наиболее достоверна информация в измеренных значениях элементов гравитационного поля, которые нельзя заменить трансформированными.

3. Трансформанты в гравиметрии, как и во всей геофизике, неотъемлемые элементы обработки прямых измерений и несут в себе лишь качественное геологическое содержание, но не о всем геологическом разрезе, а лишь о его части.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов Ю.В., Жаворонкин В.И., Слюсарев С.В. Изостатическое равновесие в верхней части земной коры // Геофизика. 2003. № 6. С. 28–24.
2. Антонов Ю.В., Зубченко Е.А., Слюсарев С.В. Природа аномалий вертикального градиента силы тяжести над горными сооружениями Южного Тянь Шаня // Изв. вузов. Геология и разведка. 1990. № 7. С. 102–107.
3. Антонов Ю.В., Слюсарев С.В. Геологическое истолкование вертикального градиента силы тяжести над горными сооружениями Средней Азии // Изв. вузов. Геология и разведка. 1994. № 5. С. 129–133.
4. Антонов Ю.В., Жаворонкин В.И., Слюсарев С.В. Лискинская аномалия вертикального градиента силы тяжести // Вестник Воронежского госуниверситета. Геология. 2001. № 11. С. 204–209.
5. Антонов Ю.В., Котов В.Н., Слюсарев С.В. Опыт градиентной съемки силы тяжести при поисках сульфидного оруденения на Воронежском массиве // Изв. вузов. Геология и разведка. 1991. № 5. С. 102–107.
6. Копцев В.В. Отчет о результатах геофизических работ на Жигаевском участке КМА. Курская геофизическая экспедиция, Курск, 1950. 124 с.
7. Котельников В.А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи // Мат. к 1-му всесоюзному съезду ВЭК. М., 1933. С. 75–81.

Воронежский государственный университет
Рецензент — Ю.И. Блох

