



## ОПЫТНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ЗНАЧЕНИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ И ЕЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА

Р. В. Груздев<sup>1</sup>, Д. Ю. Константинов<sup>2</sup>, В. В. Ромашко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Востокгеология, Чита, Россия; <sup>2</sup>Норильскгеология, Санкт-Петербург, Россия

Описывается методика полевых работ по гравиметрической съемке и измерению вертикального градиента силы тяжести с помощью высокоточного гравиметра, а также методика обработки полученных данных пакетом программ Geosoft Oasis Montaj (Канада). Приводятся результаты исследований, выводы и рекомендации для производства подобных работ методом разноуровневых измерений значений силы тяжести.

**Ключевые слова:** гравиразведка, аномалия силы тяжести, вертикальный градиент, разноуровневые измерения, поправка за рельеф.

## EXPERIMENTAL AND METHODOLOGICAL WORK ON MEASURING THE VALUES OF GRAVITY AND ITS VERTICAL GRADIENT

R. V. Gruzdev<sup>1</sup>, D. Yu. Konstantinov<sup>2</sup>, V. V. Romashko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Vostokgeologiya, Chita, Russia; <sup>2</sup>Norilskgeologiya, Saint Petersburg, Russia

The article describes the methodology of field work on gravity surveying and measurement of the vertical gravity gradient using a high-precision gravimeter. The processing technique of received data by the Geosoft Oasis Montaj software package (Canada) is described. Research results, conclusions and recommendations for the performance of such works by the method of multi-level measurements of gravity values are presented.

**Keywords:** gravity survey, gravity anomaly, vertical gradient, multi-level measurements, terrain correction.

DOI 10.20403/2078-0575-2022-1-63-68

В гравиразведке разработаны способы и методика совместного анализа измеренных значений силы тяжести, их вертикального градиента и других производных, что позволяет прежде всего уменьшить неоднозначность решения обратной задачи гравиразведки, при решении которой большое значение имеет знание истинного значения вертикального градиента силы тяжести [1–6]. Появление высокоточных гравиметров и новых методик дает возможность получать значения вертикального градиента с необходимой точностью в производственных масштабах. Расчеты показывают, что такие измерения можно производить с точностью от 10 до 3 Э, с применением высотной базы треноги 1–3 м. В связи с этим любые высокоточные гравиметрические съемки можно сопровождать измерением вертикального градиента силы тяжести при незначительных затратах.

В основе такой методики лежит следующее. С применением тех же гравиметров, которые используются и при «классической» гравиметрической съемке, определение вертикального градиента силы тяжести выполняется путем измерения силы тяжести на двух высотах с разницей  $h = 0,5–2,0$  м, в зависимости от применяемого инструмента – подставки или специального переносного штатива. В частности, штатив TRIDENT, рассчитанный на использование с гравиметрами CG-5/CG-6 AutoGrav™ (SCINTREX, Канада), обеспечивает точное позиционирование прибора на заранее определенных уровнях (рис. 1, 2). В процессе съемки измеряется приращение силы тяжести, а вертикальный гради-

ент определяется отношением этого приращения к разности высот; учитывается также влияние рельефа местности (определение высот выполняется, как и при «классической» гравиметрической съемке, – с использованием двухчастотных высокоточных геодезических приемников GPS/ГЛОНАСС).

### Описание полевых работ

В нашем случае опытно-методические работы в модификации описанной методики проводились летом 2019 г. на одном из лицензионных участков в Забайкальском крае площадью 1×2,5 км. Цель работ – оценка комплекса гравиметрических методов для поиска медно-порфирового оруденения.

Измерения значений силы тяжести производились на специально изготовленной треноге на двух уровнях с разностью высот 1 м с использованием гравиметра CG-5 AUTOGRAV канадской компании Scintrex. Первое измерение силы тяжести производилось на нижней площадке треноги (у поверхности земли), второе – на верхней.

Определение плановых координат и высотных отметок точек наблюдений выполнено в режиме RTK GPS приемниками TRIUMPH Javad. Среднеквадратическая погрешность определения высот пунктов наблюдения составила  $\pm 0,04$  м, среднеквадратическая погрешность определения координат пунктов наблюдения  $\pm 0,30$  м. Достиженные погрешности определения координат и высот пунктов геофизических измерений соответствует требованиям технического (геологического) задания и инструкции по гравиразведке.



Рис. 1. Установка двух гравиметров CG-6 на площадках штатива TRIDENT

Гравиметрические наблюдения выполнялись по замкнутым рейсам от одного центрального опорного пункта. Рейсы начинались и заканчивались на опорном пункте (ОП), длительность большинства из них не превышала 4 ч. Объем контрольных наблюдений 12 %. Для учета смещения нуля-пункта гравиметра был оборудован ОП.

В ходе измерения на каждом пункте наблюдения:

- автоматически вводились поправки за лунно-солнечные вариации;
- выполнялась постоянная компенсация угла наклона прибора;
- проводилось автоматическое подавление высокочастотных помех,
- использовался сглаживающий фильтр.

Для достижения требуемой точности измерения гравиметром выполнялись следующие условия:

- время накопления данных на каждом пункте 60 с;
- продолжительность цикла 75 с;
- задержка начала измерений 5 с.

Визуально качество измерений оценивалось по значению стандартного отклонения (SD) односекундной пробы сигнала. Среднеквадратическая погрешность наблюдаемых значений силы тяжести на пункте составила  $\pm 0,007$  мГал, погрешность из-



Рис. 2. Техника разноуровневых измерений

меренных значений вертикального градиента соответственно  $\pm 0,003$  мГал/м.

### Обработка и результаты гравиметрических наблюдений

Обработка результатов гравиметрических наблюдений проводилась в два этапа:

1) ввод поправок за смещение нуля-пункта гравиметра, увязка гравиметрических рейсов, вычисление измеренного вертикального градиента и расчет среднеквадратической ошибки наблюдаемых значений силы тяжести;

2) использование гравиметрического модуля программного пакета Geosoft Oasis Montaj™ (организация баз данных, интерпретация материалов, построение и оформление отчетных карт), в котором реализован алгоритм вычисления аномалий Буге, включая, в том числе, поправку за рельеф на основе цифровой модели (ЦМР).

Также на всех пунктах измерений градиента силы тяжести были вычислены его аномалии.

Аномальные значения градиента силы тяжести  $\Delta V_{zz}$  рассчитывались по формулам:

$$V_{zz} = \frac{g(0) - g(H)}{H},$$
$$\Delta V_{zz} = V_{zz} - 0,3086,$$

где  $V_{zz}$  – измеренное значение градиента силы тяжести; показания гравиметра, мГал:  $g(0)$  – на нижнем уровне,  $g(H)$  – на верхнем;  $H$  – высота штатива, м; 0,3086 мГал/м – нормальный градиент силы тяжести Земли в этом районе.

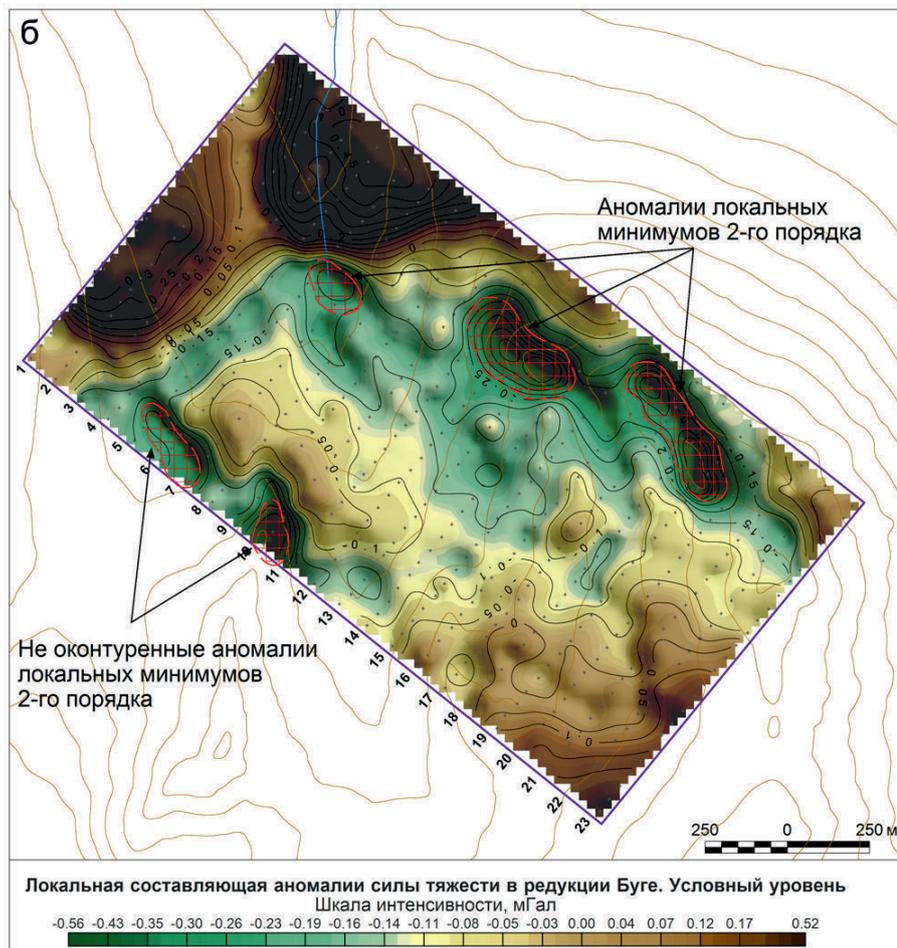
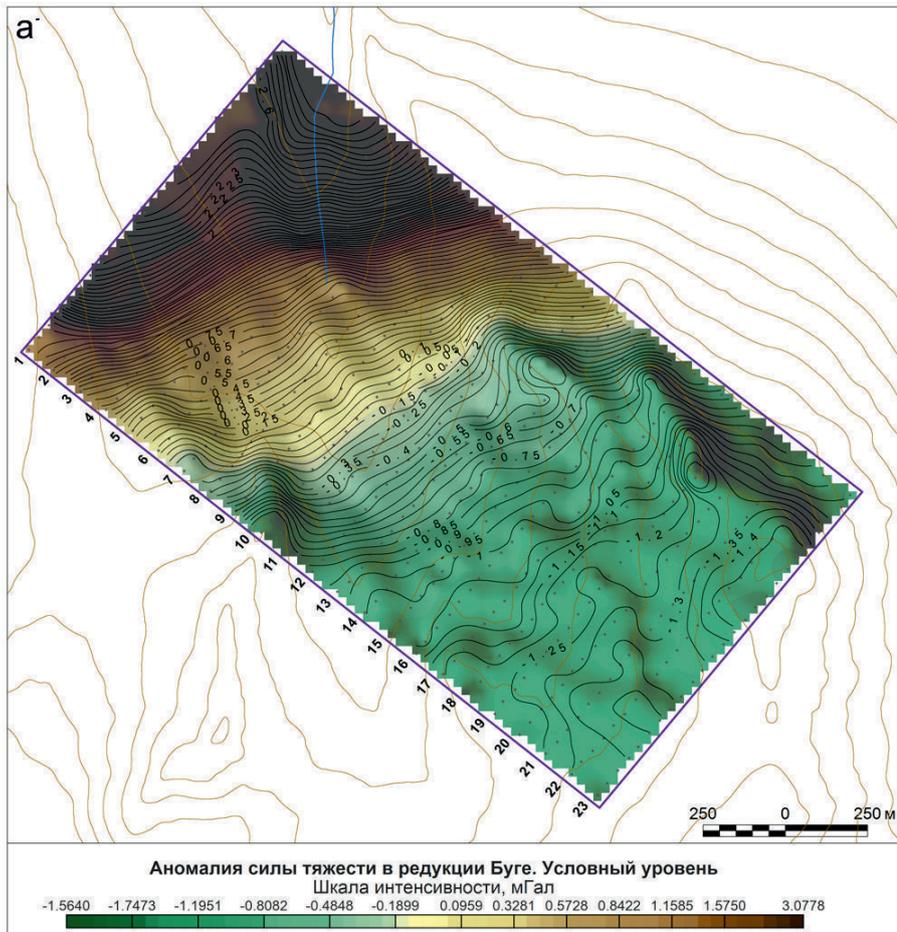
Получены следующие результаты опытно-методических работ:

1. Карта аномалий силы тяжести м-ба 1:10 000 в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя 2,67 г/см<sup>3</sup> (в условном уровне с учетом поправки за рельеф в радиусе 0–22 км с сечением 0,05 мГал) (рис. 3, а);

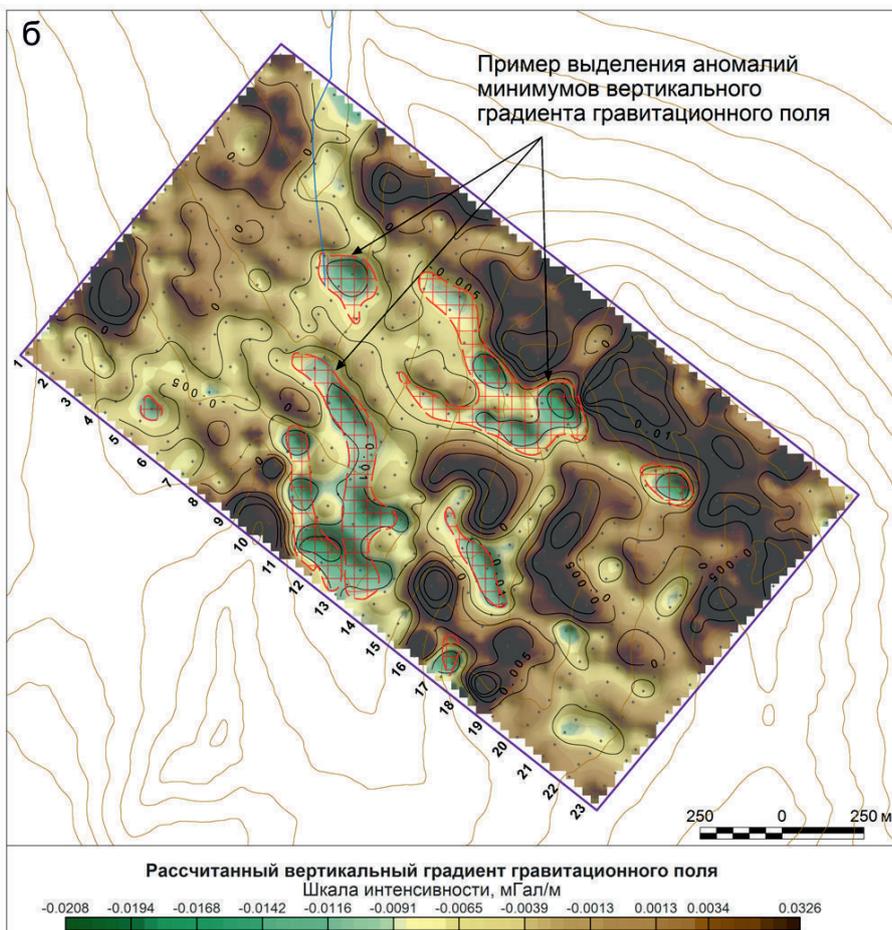
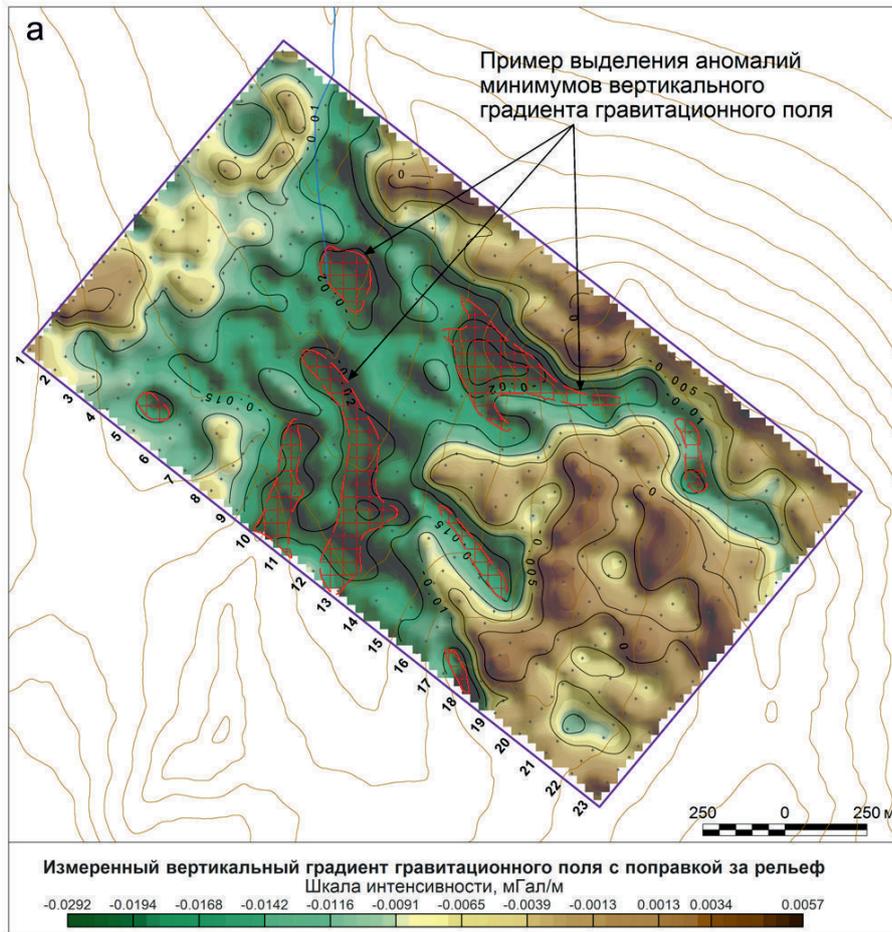
2. Карта локальных составляющих, полученная после исключения регионального фона из аномалий Буге (см. рис. 3, б);

3. Карта аномальных значений вертикального градиента силы тяжести, измеренного на участке опытно-методических работ (рис. 4, а);

4. Карта значений вертикального градиента силы тяжести, вычисленных по значениям аномалий Буге (см. рис. 4, б).



**Рис. 3.** Карты аномального поля силы тяжести в редукции Буге (а) и локальной составляющей силы тяжести в редукции Буге (б) с изолиниями рельефа



**Рис. 4.** Сопоставление результатов измеренного вертикального градиента силы тяжести с поправкой за рельеф (а) и рассчитанного на основе обработки двухуровневых наблюдений силы тяжести (б)



Структура гравитационного поля площади работ хорошо дифференцирована: четко выделяются отдельные разноранговые локальные аномалии поля силы тяжести (см. рис. 3, а).

Разделение аномалий Буге на региональную и локальную составляющие производилось средствами Geosoft Oasis Montaj™ в модуле Magmap Filtering с применением алгоритмов выделения локальных аномалий на основе методов осреднения и частотной фильтрации (Gaussian Regional и Upward Continuation Filter). Остаточные (локальные) аномалии выделяются и в модуле Grid Math как разность исходного поля и трансформированного регионального.

Локальные гравитационные минимумы второго порядка и аномалии вертикального градиента приурочены: 1) к тектонически ослабленным зонам (дробления и разуплотнения); 2) к проявлениям эксплозивно-гидротермальных брекчий; 3) к прорывам малыми интрузиями и дайками третьей фазы гранитоидного комплекса.

Значения вертикального градиента, вычисленные по аномалиям Буге, не в полной мере соответствуют измеренным (ср. рис. 4, а и 4, б). Это обусловлено тем, что точность практических вычислений вертикального градиента зависит от точности определения аномалий Буге [4, б].

Определить действительную величину аномального вертикального градиента силы тяжести можно лишь путем его **непосредственного измерения**. Однако в ходе анализа изолиний рельефа дневной поверхности стала очевидной взаимосвязь локальных превышений и контрастных локальных положительных аномалий измеренного вертикального градиента поля силы тяжести. По всей видимости, контрастные формы рельефа оказывают влияние на результаты наблюдений. По этой причине был выполнен расчет поправок за рельеф, в результате чего часть «ложных» аномалий от рельефа удалось компенсировать.

Количественная интерпретация аномалий вертикального градиента не проводилась, что, очевидно, является этапом дальнейших исследований в направлении развития этой методики.

## Выводы

1. Измерение вертикального градиента силы тяжести при гравиметрической съемке – хорошее подспорье для уверенного выделения локальных аномалий на участках гравитационной ступени. Это позволяет картировать зоны дробления и разуплотнения геологического разреза, которые определяются отрицательными аномалиями вертикального градиента.

2. Совместный анализ аномалий силы тяжести Буге и измеренных значений вертикального градиента резко повышает однозначность геологической интерпретации за счет их различных дифференциальных и интегральных характеристик, осо-

бенно при наличии компенсирующих друг друга плотностных неоднородностей, так как аномалии вертикального градиента силы тяжести связаны с изменением плотности по вертикали и отражают влияние в основном верхней части геологического разреза.

3. Комплекс гравиметрической съемки с измерениями вертикального градиента силы тяжести, будучи перспективным направлением гравиразведки, требует специального подхода.

Во-первых, для корректного измерения вертикального градиента силы тяжести необходимо производить высокоточные гравиметрические наблюдения (микрोगальная съемка). Для этого необходимо использовать гравиметры класса А, точность измерения которыми должна быть не хуже 0,001 мГал.

Во-вторых, для интерпретации аномалий вертикального градиента в условиях пересеченной местности необходимо вносить поправки за влияние рельефа в ближней зоне, поскольку значения аномалий вертикального градиента могут быть гораздо меньше значений поправок.

В-третьих, наблюдения гравиметром на двух уровнях треноги требует обеспечения плотного контакта с поверхностью земли (заглубление ножек треноги), обеспечивающего устойчивость гравиметра, что накладывает некоторые ограничения на сезонность выполнения работ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов Ю. В. Плотностные неоднородности в земной коре, гипотеза изостазии и поверхность Мохо // Геофизика. – 2005. – № 1. – С. 62–68.
2. Антонов Ю. В., Варламов А. С., Зубченко Е. А. Методика и результаты измерений вертикального градиента силы тяжести // Разведочная геофизика. – 1988. – Вып. 108. – С. 94–99.
3. Антонов Ю. В., Винокуров С. К., Слюсарев С. В. Опыт градиентной съемки силы тяжести при поиске сульфидного оруденения на Воронежском массиве // Изв. вузов. Сер. Геология и разведка. – 1991. – № 5. – С. 102–107.
4. Антонов Ю. В., Жаворонкин В. И., Слюсарев С. В. Возможности гравиметрии при поисках кимберлитовых трубок на примере Архангельской алмазодобывающей провинции // Науч. вестн. Национальной горной академии Украины. – 2001. – № 4. – С. 73–74.
5. Антонов Ю. В., Силкин К. Ю., Черников К. С. Аномалии вертикального градиента силы тяжести и распределение сульфидно-медно-никелевые месторождений и рудопроявлений в юго-восточной части Воронежского кристаллического массива // Геологи XXI века: матер. VII Всерос. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов. – Саратов, 2006. – С. 71.
6. **Возможности** метода вертикального градиента силы тяжести при разведке магнитных аномалий трубчатого типа / Ю. В. Антонов, В. И. Жаво-



ронкин, С. В. Слюсарев и др. // Вестн. Воронежского ун-та. Геология. – 2004. – № 1. – С. 153–158.

#### REFERENCES

1. Antonov Yu.V. [Density inhomogeneities in the Earth's crust, the hypothesis of isostasis and the Moho surface]. *Geofizika*, 2005, no. 1, pp. 62–68. (In Russ.).

2. Antonov Yu.V., Varlamov A.S., Subchenko E.A. [Methods and results of measurements of the vertical gravity gradient]. *Razvedochnaya geofizika*, 1988, vol. 108, pp. 94–99. (In Russ.).

3. Antonov Yu.V., Vinokurov S.K., Slysarev E.A. [The experience of gradient gravity survey in the search for sulfide mineralization in the Voronezh massif]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka – Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration*, 1991, no. 5, pp. 102–107. (In Russ.).

4. Antonov Yu.V., Zhavoronkin V.I., Slysarev S.V. [The possibilities of gravimetry in the search for kim-

berlite pipes on the example of the Arkhangelsk diamond-bearing province]. *Nauchnyy vestnik Natsionalnoy gornoy akademii Ukrainy – Scientific Bulletin of National Mining Academy of Ukraine*, 2001, no. 4, pp. 73–74. (In Russ.).

5. Antonov Yu.V., Silkin K.Yu., Chernikov K.S. [Anomalies of the vertical gravity gradient and distribution of sulfide-copper-nickel deposits and ore occurrences in the southeastern part of the Voronezh crystallized massive]. *Geologi XXI veka: Materialy VII Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh spetsialistov* [Geologists of the 21<sup>st</sup> century: Materials of the 7<sup>th</sup> All-Russian Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Specialists]. Saratov, 2006, p. 71. (In Russ.).

6. Antonov Yu.V., Zhavoronkin V.I., Slysarev S.V. [Opportunities of the method of the vertical gradient of gravity at grading magnetic anomalies of tubular type]. *Vestnik Voronezhskogo Universiteta. Geologiya*, 2004, no. 1, pp. 153–158. (In Russ.).

© П. В. Груздев, Д. Ю. Константинов, В. В. Ромашко, 2022