

Оригинальная статья / Original article

УДК 550.831

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-3-93-105>

ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ И ИНВЕРСИИ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИСПЕРСИОННОГО И РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗОВ

© В.С. Канайкин^а, Е.Х. Турутанов^б, Б. Буянтогтох^с

^аИркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

^бИнститут земной коры СО РАН, 664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

^сИнститут астрономии и геофизики МАН, 13343, Монголия, г. Улан-Батор, ул. Ж. Лхагаасурэнгийн, 42.

РЕЗЮМЕ. Цель. Изучение возможностей регрессионного и дисперсионного анализов при количественной интерпретации гравитационных аномалий. **Методы.** Рассматриваются возможности использования метода главных компонент и сингулярного разложения матриц при трансформации и инверсии гравитационных полей на примере Уланбаатарской и Налайхской межгорных впадин (Монголия). **Результаты.** С использованием регрессионного и дисперсионного анализов получены количественные характеристики мощности рыхлых отложений исследуемых структур. Максимальная мощность отложений Уланбаатарской впадины составляет 100–200 м, Налайхской – 600 м. Полученные оценки подтверждаются результатами инверсии гравитационного поля исследуемых впадин с помощью других методов. **Выводы.** Результаты трансформации и инверсии гравитационного поля осадочных отложений малой мощности (100–200 м) при замене бесконечных по протяженности прямоугольных призм на параллелепипеды, ограниченные по простиранию, меняются незначительно и остаются в первоначальных пределах (при сохранении величины недостатка плотности осадков). У впадины, заполненной мощной толщей осадков, происходит значительное увеличение этой характеристики (с 600 м до 900 м) при сохранении недостатка плотности осадков. Подобные вариации осадочной толщи исследуемых объектов можно объяснить величиной угла видимости отдельно взятых геометрических тел, аппроксимирующих линзы осадков. Применение метода главных компонент аппарата дисперсионного анализа при выделении региональной и локальной (остаточной) составляющих гравитационного поля и инверсии аномального поля силы тяжести с использованием сингулярного разложения матриц регрессионного метода исследования вполне возможно и достаточно эффективно.

Ключевые слова: гравитационная аномалия, инверсия, метод главных компонент, сингулярное разложение матриц.

Информация о статье. Дата поступления 5 марта 2018 г.; дата принятия к печати 28 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Канайкин В.С., Турутанов Е.Х., Буянтогтох Б. Особенности трансформации и инверсии гравитационного поля с применением дисперсионного и регрессионного анализов // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 3. С. 93–105. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-93-105

^аКанайкин Виктор Степанович, доцент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем Института недропользования, e-mail: kanvs@yandex.ru

Viktor S. Kanaikin, Associate Professor of the Department of Applied Geology, Geophysics and Geoinformation Systems of the Institute of Subsoil Use, e-mail: kanvs@yandex.ru

^бТурутанов Евгений Хрисанфович, доктор геолого-минералогических наук, зав. лабораторией комплексной геофизики, тел.: (3952) 428792, e-mail: tur@crust.irk.ru

Evgeny Kh. Turutanov, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Head of the Laboratory of Complex Geophysics, tel.: (3952) 428792, e-mail: tur@crust.irk.ru

^сБуянтогтох Базарин, аспирант, научный сотрудник, тел.: 8 (97611) 458024, e-mail: bazaryn_b@yahoo.com
Buyantogtokh Bazarin, Postgraduate, Scientific Researcher, tel.: 8 (97611) 458024, e-mail: bazaryn_b@yahoo.com

FEATURES OF GRAVITY FIELD TRANSFORMATION AND INVERSION USING VARIANCE AND REGRESSION ANALYSES

© V.S. Kanaikin^a, E.Kh. Turutanov^b, B. Buyantogtokh^c

^aIrkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation

^bInstitute of the Earth's crust SB RAS,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russian Federation

^cInstitute for Astronomy and Geophysics MAS,
42 J. Lhagaasurengiin, Ulaanbaator 13343, Mongolia

ABSTRACT. The **Purpose** of the paper is to study the possibilities of regression and variance analyses under quantitative interpretation of gravitational anomalies. **Methods.** On example of the Ulanbaatar and Nalaikh intermountain depressions (Mongolia) the application possibilities of the principal component method and the pseudo-inverse algorithm under the transformation and inversion of gravitational fields are considered. **Results.** The quantitative characteristics of the thickness of loose deposits of the structures under investigation are obtained through regression and variance analyses. The maximum thickness of the deposits of the Ulanbaatar depression is 100-200 m whereas the Nalaikh depression is 600 m. The obtained estimates are confirmed by the results of investigated depression gravitational field inversion by other methods. **Conclusions.** The transformation and inversion results of the gravitational field of sedimentary deposits of low thickness (100-200 m) when replacing infinite length rectangular prisms by the parallelepipeds limited along the strike vary insignificantly and remain within the initial limits (while maintaining the magnitude of the lack of density). The depression filled with the sediments of great thickness features a significant increase in this characteristic (from 600 m to 900 m) while maintaining the lack of sediment density. Such variations in the sedimentary thickness of the studied objects can be explained by the magnitude of the visibility angle of individual geometric bodies approximating precipitation lenses. It is found that the application of the method of principal components of the variance analysis in the identification of the regional and local (residual) components of the gravitational field and the inversion of the anomalous gravity field using a pseudo-inverse algorithm of the regression research method are quite possible and effective.

Keywords: *gravitational anomaly, inversion, method of principal components, pseudo-inverse algorithm*

Article info. Received 5 March 2018; accepted for publication 28 August 2018; available online 28 September 2018.

For citation. Kanaikin V.S., Turutanov E.Kh., Buyantogtokh B. Features of gravity field transformation and inversion using variance and regression analyses. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits, 2018, vol. 41, no. 3, pp. 93–105. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-93-105 (In Russian).

Введение

Количественная интерпретация гравитационных данных предполагает использование различных способов обработки исходных материалов. В частности, при интерпретации потенциальных геофизических полей достаточно часто применяются методы регрессионного и дисперсионного анализов. Эффективность применения этих методов для количественной интерпретации гравитационных данных зависит от сложности геологической ситуации изучаемого района,

а следовательно, и от характера геофизического поля [1–4]. В рамках данной публикации рассматриваются возможности использования аппарата дисперсионного и регрессионного анализов для трансформации и инверсии гравитационных полей Уланбаатарской и Налайхской впадин (Монголия) с целью оценки мощности заполняющих их осадочных отложений.

Изучение строения Налайхской впадины вызывает закономерный интерес не только с научной, но и с практиче-

ской точки зрения, поскольку с ней связано промышленное месторождение бурых углей. Она находится в 35 км к юго-востоку от Тольской (Уланбаатарской) депрессии на пересечении Хонхоринской системы грабенов и Дэндэйского глубинного разлома, которые контролируют эту структуру.

Средняя плотность рыхлых отложений Уланбаатарской впадины принята по данным результатов многочисленных денситометрических измерений и составляет 2100 кг/м^3 [5]. Вмещающие впадину породы Хэнтэйской серии представлены в основном нижнекарбовыми песчаниками и алевролитами. Величина плотности коренных пород принимается равной 2700 кг/м^3 . Недостаток плотности осадочного чехла относительно пород фундамента, оцененный по денсиметрическим замерам и по корреляции сейсмических и

гравитационных данных, для Налайхской впадины составляет $-0,35 \text{ г/см}^3$ [5–7].

Материалы и методы исследования

Схемы исходных гравитационных полей Уланбаатарской и Налайхской впадин [5, 7] приведены на рис. 1, а; 2, а. Анализируя характер гравитационного поля Уланбаатарской впадины, можно отметить, что форма поля достаточно сложная.

На площади этой впадины фиксируется две аномалии силы тяжести: одна расположена в западной части, вторая – на северо-востоке. Наиболее интенсивная аномалия силы тяжести расположена в северо-восточной части впадины. Максимальная амплитуда перепада гравитационного поля на данном участке составляет 14 мГал.

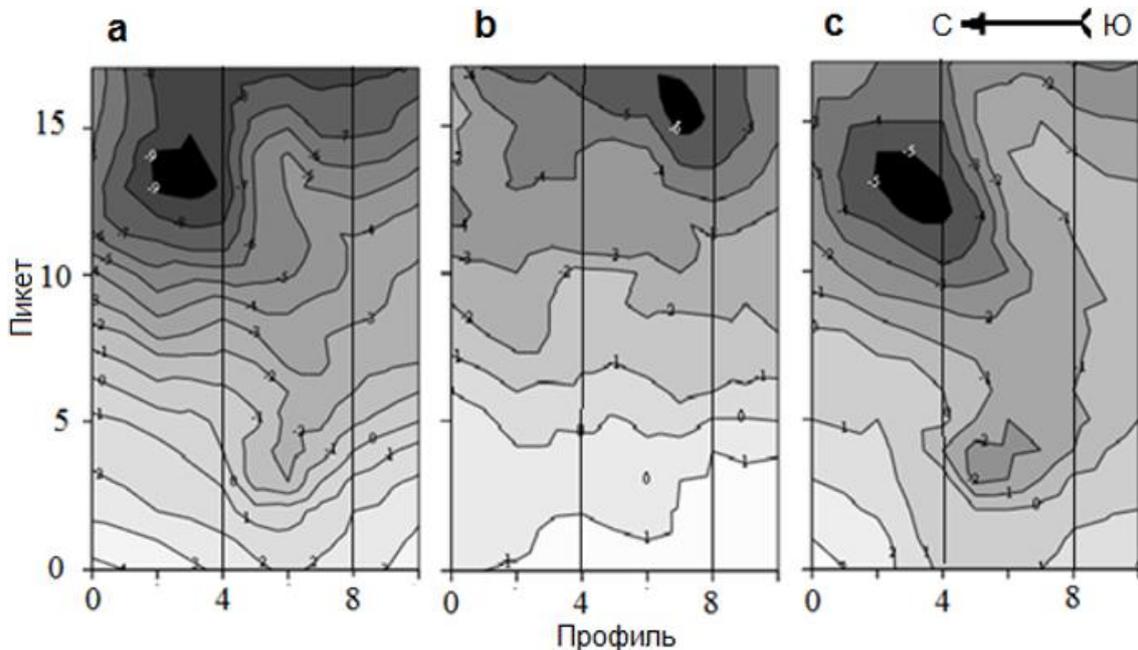


Рис. 1. Схемы составляющих гравитационного поля в редуции Буге Уланбаатарской впадины

(в относительном уровне, сечение через 1 мГал):

а – исходное поле; б – первая главная компонента или региональный фон;
с – остаточные локальные аномалии

Fig. 1. Diagrams of gravitational field components in the Bouguer reduction of the Ulanbaatar depression

(at a relative level, cross section in 1 mGal):

а – initial field; б – first major component or regional background;
с – residual local anomalies

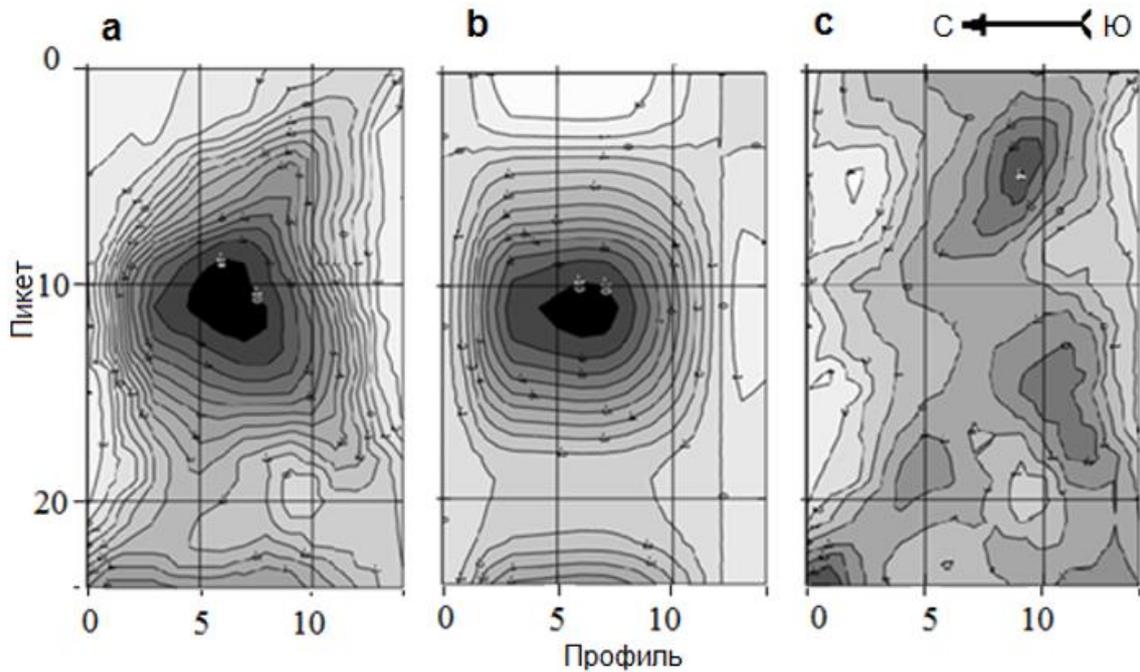


Рис. 2. Схемы составляющих гравитационного поля в редукции Буге Налайхской впадины

(в относительном уровне, сечение через 1 мГал):

a – исходное поле; b – первая главная компонента соответствующая локальной аномалии; c – региональный фон

Fig. 2. Diagrams of gravitational field components in the Bouguer reduction of the Nalaikh depression

(at a relative level, section in 1 mGal):

a – initial field; b – first major component corresponding to a local anomaly; c – regional background

Выделение остаточных аномалий в чистом виде (трансформация поля силы тяжести) с целью их дальнейшей количественной интерпретации – достаточно сложная процедура, в результате которой необходимо рассчитать региональный фон гравитационного поля и ввести соответствующие поправки в исходное поле.

Анализ гравитационного поля Налайхской впадины позволяет констатировать, что на ее площади существует одна интенсивная крупная аномалия силы тяжести изометричной формы, расположенная в центральной части впадины. Эта аномалия обусловлена, судя по геологическим данным, отложениями мелового и четвертичного возраста. Максимальная амплитуда перепада гравитационного поля на данном участке

составляет 12 мГал. Для уверенного формирования локальной аномалии необходимо рассчитать региональную составляющую гравитационного поля. Расчет регионального фона как для Уланбаатарской, так и для Налайхской впадины был выполнен с помощью дисперсионного анализа. Для этого использовался метод главных компонент [1, 3, 4, 8].

С целью реализации данного этапа интерпретации исходные гравитационные поля каждого объекта были оцифрованы и представлены в виде двухмерных массивов. На основе этих данных для каждого объекта были рассчитаны ковариационные матрицы. Анализ ковариационных матриц позволяет определить главные независимые факторы и далее рассчитать интенсивность и характер

регионального фона как для Уланбаатарской, так и для Налайхской впадины (рис. 1, *b*; 2, *c*). Методика подобной обработки описывается в источниках [3, 8]. Забегая вперед, отметим, что для Уланбаатарской впадины первая главная компонента обусловлена региональным фоном (см. рис. 1, *b*), а для Налайхской котловины главная компонента связана собственно с локальной аномалией (см. рис. 2, *c*). Таким образом, локальная аномалия для Налайхской впадины рассчитывается непосредственно по итогам обработки методом главных компонент, и для ее выделения не нужно знать значения регионального фона, который, по-видимому, связан со второй компонентой.

Не останавливаясь на описании теории метода главных компонент, отметим, что первая главная компонента считается связанной, как правило, с региональным фоном [2–4], а точнее, с неким геологическим фактором, объясняющим наибольшую энергию и, соответственно, наибольший вклад в анализируемое гравитационное поле. Но иногда может быть и наоборот, то есть если амплитуда, ширина и протяженность локальной аномалии – ее энергия – значительно больше, чем аналогичная характеристика региональной составляющей, то первая главная компонента будет связана не с региональным фоном, а с локальной составляющей поля силы тяжести. Исходя из анализа аномалий Буге Уланбаатарской и Налайхской впадин (см. рис. 1, 2), именно эти два случая описывают соотношение вышеперечисленных характеристик гравитационных полей исследуемых депрессий.

Для того чтобы убедиться, что первая главная компонента соответствует либо региональной, либо локальной составляющей гравитационного поля, необходимо для каждой из этих впадин рассчитать осредненный характер регионального поля и локальной аномалии, то есть определить их осредненный энерге-

тический сигнал через дисперсию этого сигнала. Расчет осредненного энергетического сигнала можно осуществить по известным формулам, используя при этом, соответственно, фоновые и локальные составляющие анализируемых гравитационных полей:

$$G_i^{\text{фон}} = \sum_i^N \sum_j^M \frac{\Delta g_{i,j}^{\text{фон}}}{M}; G_i^{\text{лок}} = \sum_i^N \sum_j^M \frac{\Delta g_{i,j}^{\text{лок}}}{M},$$

где i – номер пикета; j – номер профиля; N, M – количество пикетов и профилей соответственно; $\Delta g_{i,j}^{\text{фон}}, \Delta g_{i,j}^{\text{лок}}$ – значения фонового или локального гравитационного поля на i пикете, j профиля.

Если энергетическую оценку гравитационного поля (его региональной или локальной составляющих) осуществлять только по одному отдельно взятому профилю, то полученная величина будет некорректна, поскольку такой профиль может пересекать как экстремальную часть аномалии, так и ее периферическую часть. При этом искусственно будет подчеркнута интенсивность либо локальной (остаточной), либо фоновой составляющей гравитационного поля. На рис. 3 приводятся региональные поля и локальные аномалии, представленные осредненными энергетическими характеристиками, соответствующими всей площади исследований.

На этом рисунке видно, что площадь, ограниченная графиком регионального фона и условной горизонтальной линией (см. рис. 3, *a*), несколько больше, чем площадь, ограниченная графиком локальной аномалии силы тяжести и некой горизонтальной линией. Это подтверждает тот факт, что вклад в суммарную дисперсию исходного гравитационного поля Уланбаатарской впадины от регионального фона больше, чем вклад от локальной аномалии силы тяжести.

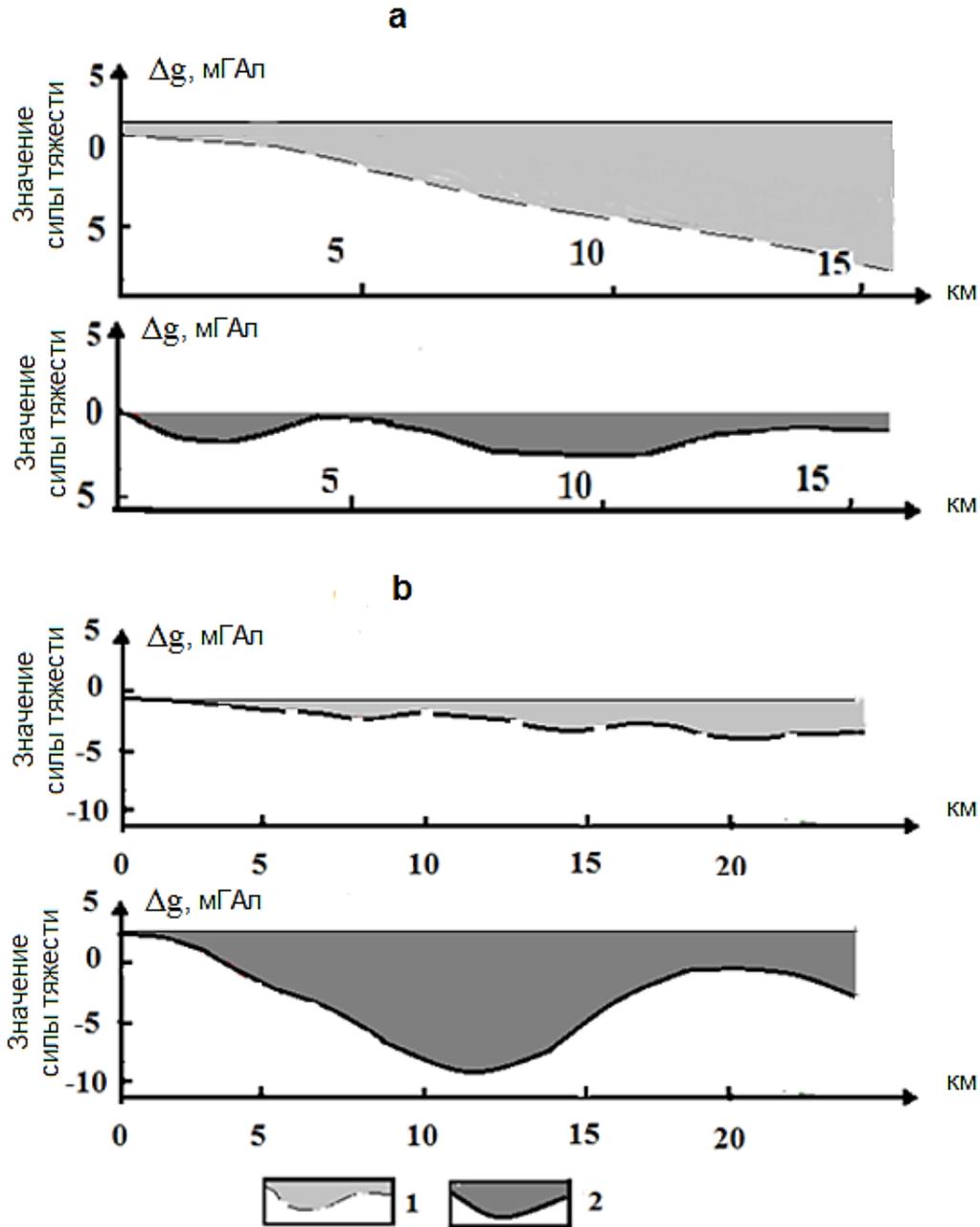


Рис. 3. Графический анализ характера гравитационного поля Уланбаатарской впадины (а) и Налайхской впадины (б):

- 1 – средняя по площади «энергия» сигнала регионального фона;
2 – средняя по площади «энергия» локальной аномалий силы тяжести

Fig. 3. Graphical analysis of gravitational field nature of the Ulanbaatar depression (a) and the Nalaikh depression (b):

- 1 – regional background signal “energy” average in area;
2 – local gravity anomaly “energy” average in area

Анализируя данные, представленные на рис. 3, *b*, можно отметить, что площадь, ограниченная графиком регионального фона и некой ограничивающей

прямой, значительно меньше, чем подобная ей площадь, ограниченная графиком локальной аномалий силы тяжести. Это является свидетельством неравноценно-

сти вкладов сигналов от регионального фона и локальной аномалии силы тяжести в суммарную дисперсию исходного гравитационного поля Налайхской впадины.

Выполненные расчеты позволяют утверждать, что для Уланбаатарской впадины первая главная компонента связана с региональным фоном, а для Налайхской котловины главная компонента обусловлена собственно локальной аномалией поля силы тяжести.

Следующим этапом интерпретации является инверсия остаточных гравитационных аномалий, то есть определение мощности осадочных отложений Уланбаатарской и Налайхской впадин.

Решение обратной задачи осуществлено с использованием регрессионных методов [8–10]. Количественные вычисления выполнены в полном объеме по системе интерпретационных профилей для каждой из двух площадей исследования. Более подробно нами рассмотрены расчеты по одному интерпретационному профилю для каждой площади. Для этого выбраны наиболее характерные профили, проходящие через центральные аномальные зоны исследуемых участков. Например, профиль 5 (для Уланбаатарской) и профиль 7 (для Налайхской) впадин. Длина этих профилей приблизительно равна 20000 и 24000 м соответственно.

С целью количественного анализа для каждого интерпретационного профиля сформированы линейные математические модели в виде системы уравнений $\Delta G_{лок} \approx B \cdot \bar{a}$, где B – матрица плана размерностью $n \times k$; $\bar{a} = [a_1, \dots, a_k]$ – вектор-столбец определяемых коэффициентов (в нашем случае это значение избыточных плотностей тел правильной геометрической формы, выполняющих роль аномалиеобразующих объектов); n – количество пикетов; k – число аномалиеобразующих объектов, которыми аппроксимирован изучаемый геологический разрез.

Для вычисления коэффициентов $\bar{a} = [a_1, \dots, a_k]$ использован алгоритм, основанный на применении сингулярного разложения матрицы [8–10]. Сингулярное разложение позволяет выбирать решения с учетом реальной точности вычислений и исходных данных путем отбрасывания элементов разложения, соответствующих сингулярным числам, меньшим заданной точности наблюдений гравитационного поля данной съемки.

Решение обратной задачи гравиразведки заключается в определении морфологии плотностных неоднородностей, слагающих геологический разрез. Для этого необходимо аппроксимировать изучаемый геологический разрез набором правильных геометрических тел. Геологическая структура в районе пятого профиля Уланбаатарской впадины была представлена в виде набора из 32 горизонтальных прямоугольных призм ($k = 32$), что соответствует четырем слоям по восемь призм в каждом слое (рис. 4, а) [9, 11]. Размеры каждой призмы приняты следующие: ширина (горизонтальная мощность параллельно интерпретационному профилю) – 2500 м, длина (горизонтальная мощность перпендикулярно интерпретационному профилю) бесконечна, вертикальная мощность – 50 м. Геологический разрез по седьмому профилю Налайхской впадины был представлен в виде набора из 48 горизонтальных прямоугольных призм ($k = 48$), что соответствует шести слоям по восемь призм в каждом слое (рис. 4, б). Размеры каждой призмы приняты следующие: ширина – 3000 м, длина бесконечна, вертикальная мощность – 100 м.

Увеличение количества слоев, то есть увеличение вертикальной мощности аномалиеобразующего объекта, приводит к уменьшению избыточной плотности призм. Поэтому, изменяя число и геометрические размеры призм, можно аппроксимировать различные по объему геологические объекты.

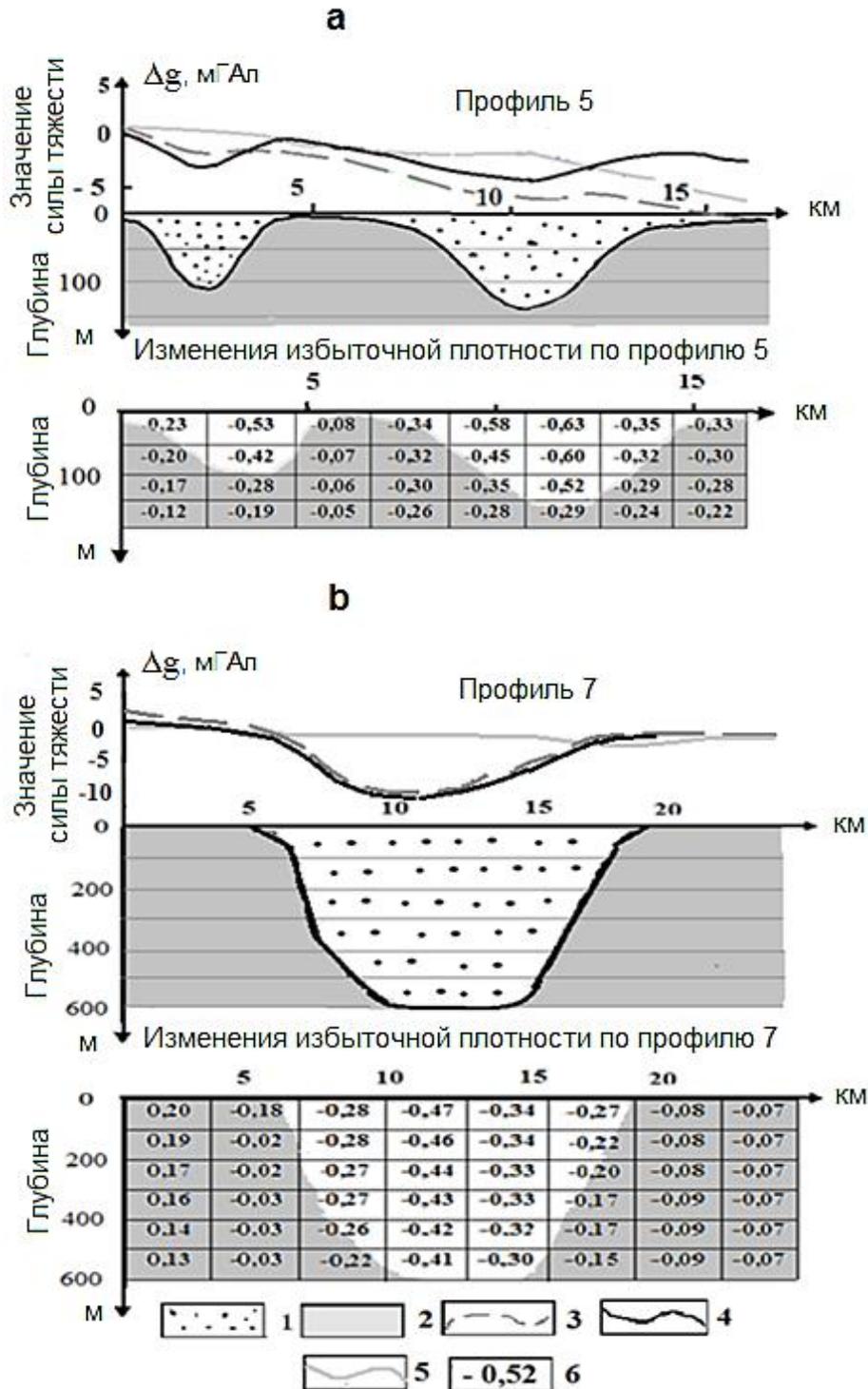


Рис. 4. Интерпретационные разрезы по Уланбаатарской (а) и Налайхской (б) впадинам:
1 – осадочные отложения; 2 – вмещающие породы; 3 – графики силы тяжести исходного поля ΔG в редукции Буге, мГал; 4 – графики локальных аномалий силы тяжести, мГал; 5 – графики регионального фона $\Delta G_{\text{рег}}$, мГал; 6 – избыточные плотности прямоугольных призм, г/см³

Fig. 4. Interpretation sections along the Ulanbaatar (а) and Nalaikh (б) depressions:
1 – sedimentary deposits; 2 – host rocks; 3 – gravity graphs of the initial field ΔG in the Bouguer reduction, mGal; 4 – graphs of local anomalies of gravity, mGal; 5 – graphs of the regional background $\Delta G_{\text{рег}}$, mGal; 6 – excess densities of rectangular prisms, g/cm³

Далее для n точек профиля и k базисных функций в первом и втором случае были рассчитаны соответствующие матрицы плана (B) размерностью $n \times k$. Каждый элемент b_{ij} этой матрицы выражает эффект j -й прямоугольной призмы ($j = 1, \dots, k$) в i -й точке профиля ($i = 1, \dots, n$), причем плотность такой призмы принята равной 1.

Значения избыточной (недостаточной в данном случае) плотности призм, аппроксимирующих осадочные отложения Уланбаатарской впадины, вычисленные с помощью математического аппарата регрессионного анализа [3, 7], приведены на примере интерпретационного профиля 5 и варьируют в пределах (-0,4...-0,6) г/см³ (см. рис. 4, а). Эта плотность близка к оцененной ранее [1] по данным денситометрии величине и соответствует мощности кайнозойских осадков в 150–200 м.

Недостаток плотности осадочных отложений Налайхской котловины, вычисленный аналогичным способом вдоль седьмого интерпретационного профиля, находится в интервале -0,30...-0,35 г/см³ (см. рис. 4, б) и близок к оценке, полученной по денсиметрическим замерам и по корреляции сейсмических и гравитационных данных [1, 4, 6]. Эта величина соответствует толщине (мощности) осадочной линзы, равной 600 м.

Как было сказано выше, для аппроксимации линз осадочных отложений впадин использован набор правильных геометрических тел, а именно прямоугольных призм. Поскольку горизонтальная призма не имеет ограничения по одной из своих осей (например, по оси Y , направленной перпендикулярно профилю наблюдения), а параллелепипед имеет ограниченный размер по этой оси, то объем призмы существенно отличается от объема параллелепипеда. Эта особенность их геометрии может сказаться на результатах расчетов избыточных плотностей аномалиеобразующих

тел. Отсюда возникает необходимость проверить, каким образом изменится результат решения обратной задачи гравиразведки, если геологический разрез аппроксимировать не призмами, а параллелепипедами.

С этой целью были осуществлены дополнительные определения избыточных (недостаточных) плотностей обеих впадин, при вычислении которых вместо горизонтальных призм использовался набор параллелепипедов с такими же, за исключением оси Y , горизонтальными размерами. Он был ограничен от +500 до -500 м, то есть размер параллелепипеда для Уланбаатарской впадины равен 2500×1000×50 м, а для Налайхской – 3000×1000×150 м.

Вычисления показали, что для Уланбаатарской впадины результаты инверсии гравитационного поля изменяются незначительно. Вертикальная мощность осадочных отложений остается в прежних пределах (при сохранении величины недостатка плотности) и составляет 150–200 м. Для Налайхской впадины происходит значительное увеличение вертикальной мощности осадков с 600 м до 900 м при сохранении избыточной плотности в диапазоне -0,30...-0,35 г/см³ (рис. 5). Увеличение вертикальной мощности осадочных отложений Налайхской впадины и незначительное изменение толщины осадков для Уланбаатарской впадины можно объяснить величиной угла видимости отдельно взятого параллелепипеда. При небольших глубинах залегания подошвы геологического тела (150–200 м) угол видимости призмы или параллелепипеда близок к 180°, то есть значительная часть аномалиеобразующей массы расположена где-то в стороне и слабо влияет на величину гравитационного поля в пункте его измерения. При увеличении глубины подошвы тела до 600 м и более один из горизонтальных размеров параллелепипеда, а именно его длина по оси $Y = 1000$ м, становится

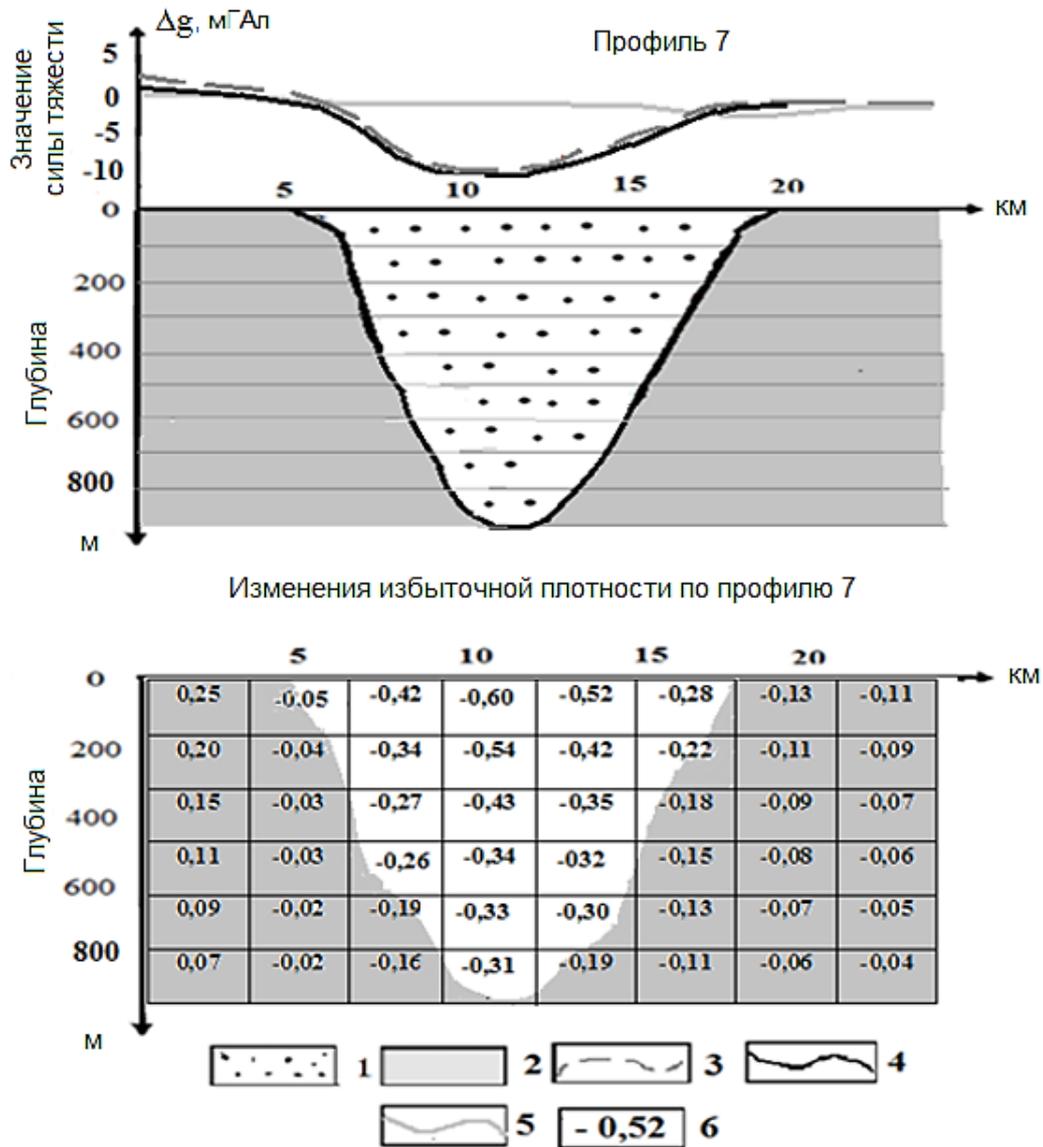


Рис. 5. Интерпретационный разрез по профилю 7 Налайхской впадины:
1 – осадочные отложения; 2 – вмещающие породы; 3 – графики силы тяжести исходного поля ΔG в редукции Буге, мГал; 4 – графики локальных аномалий силы тяжести, мГал; 5 – графики регионального фона ΔG_{reg} , мГал; 6 – избыточные плотности прямоугольных призм, г/см³

Fig. 5. Interpretation section along the profile 7 of the Nalaikh depression:
1 – sedimentary deposits; 2 – host rocks; 3 – gravity graphs of the initial field ΔG in the Bouguer reduction, mGal; 4 – graphs of local anomalies of gravity, mGal; 5 – graphs of the regional background ΔG_{reg} , mGal; 6 – excess densities of rectangular prisms, g/cm³

соизмеримой с этой величиной, а угол видимости стремится к значению 90–60°. Избыточные массы в этом случае находятся не где-то сбоку от точки расчета или наблюдения, а практически под ней и поэтому оказывают максимальное

влияние на результат измерений или вычислений гравитационного поля.

Другими словами, можно сказать, что в рассматриваемом примере объем призм значительно больше, чем объем параллелепипедов. Поэтому избыточная

плотность параллелепипедов, необходимая для обеспечения наблюдаемого поля силы тяжести без изменения последнего, должна увеличиться. То есть для того, чтобы величина избыточной плотности линзы осадков сохранялась неизменной, количество параллелепипедов, аппроксимирующих ее, необходимо увеличить. Введение этих дополнительных тел приводит к увеличению мощности исследуемого объекта и, следовательно, к снижению расчетных значений его плотности до величины, определенной при вычислениях с помощью призм.

Результаты интерпретации гравиметрических данных

Результаты интерпретации гравитационных аномалий отражены на схемах составляющих гравитационного поля Уланбаатарской (см. рис. 1) и Налайхской (см. рис. 2) впадин, на схеме графического анализа характера составляющих гравитационного поля (см. рис. 3), на интерпретационных разрезах (см. рис. 4, 5).

Анализ характера составляющих аномального поля силы тяжести Уланбаатарской и Налайхской впадин позволяет сделать вывод, что гравитационное поле Уланбаатарской впадины более сложное, чем таковое для Налайхской котловины. Его региональная составляющая вносит более весомый вклад в суммарное гравитационное поле, чем локальные аномалии. Наоборот, для Налайхской котловины наибольший вклад в результирующее поле осуществляет собственно локальная аномалия, что показывают результаты обработки исходных полей методом главных компонент (см. рис. 3). В целом характер регионального гравитационного фона и локальных аномалий как для Уланбаатарской (см. рис. 1), так и для Налайхской впадины (см. рис. 2) по своей интенсивности и морфологии не противоречит геологическому строению изучаемых объектов, что подтверждает возможность

использования факторного анализа для выделения регионального гравитационного фона с целью решения задач структурной геологии.

Применение метода главных компонент для выделения региональной составляющей при интерпретации гравитационных полей приводит к надежной оценке этой составляющей в случае существенного преобладания ее энергии (дисперсии) над энергией (дисперсией) локальных аномалий [2, 3]. Но, как было отмечено ранее, возможна и обратная ситуация, когда наблюдается преобладание энергии (дисперсии) локальной аномалий над энергией (дисперсией) региональной составляющей.

Решение обратной задачи гравirazведки для Уланбаатарской и Налайхской впадин осуществлялось методами регрессионного анализа, а именно сингулярного разложения матриц. Этот метод требует аппроксимации изучаемого геологического разреза набором правильных геометрических тел, в нашем случае набором горизонтальных прямоугольных призм или параллелепипедов. Использование аппарата сингулярного разложения матриц позволяет осуществлять выбор «регуляризованных» решений с учетом заданной точности полевых наблюдений [9, 10].

В результате решения линейной обратной задачи гравirazведки (см. рис. 4, 5) были получены количественные характеристики мощности рыхлых отложений Уланбаатарской и Налайхской впадин и данные о морфологических особенностях погруженных частей кристаллического фундамента.

Вычисления показали, что замена прямоугольных призм на параллелепипеды в качестве аномалиеобразующих объектов приводит к тому, что результаты инверсии гравитационного поля для Уланбаатарской впадины изменяются незначительно. Для Налайхской впадины происходит значительное увеличение

вертикальной мощности осадков с 600 до 900 м и более. Геометрические и физические характеристики осадочных отложений хорошо совпадают с аналогичными характеристиками, полученными с использованием других методик интерпретации [5–7], выполненных в двумерном варианте для Уланбаатарской впадины и в трехмерном – для Налайхской.

Выводы

На основе проведенных исследований можно сделать вывод о том, что применение дисперсионного и регрессионного анализов, а именно метода главных компонент и сингулярного разложения матриц при трансформации и инверсии гравитационного поля для условий межгорных впадин, вполне приемлемо и дает хорошие результаты.

Библиографический список

1. Блох Ю.И. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. М.: Изд-во РГГРУ, 2009. 230 с.
2. Девис Дж. Статистика и анализ геологических данных / пер. с англ. М.: Мир, 1977. 600 с.
3. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. М.: Недра, 1986. 337 с.
4. Яновская Т.Б., Прохорова Л.Н. Обратные задачи геофизики. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. 214 с.
5. Арвисбаатар Н., Турутанов Е.Х., Буянтогтох Б., Цэндсүрэн Д. Глубинное строение Уланбаатарской впадины по гравиметрическим данным (Монголия) // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 5. С. 53–61.
6. Вахромеев Г.С. К вопросу формирования физико-геологических моделей месторождений полезных ископаемых Монгольской Народной Республики // Вопросы геологии и металлогении Восточной Монголии. Улан-Батор: Изд-во МонГУ, 1979. С. 236–244.
7. Дугараа П., Арвисбаатар Н. Петроплотностная характеристика пород Жанчивланского рудного узла и его окрестностей // Вопросы геологии и полезных ископаемых Центральной и Восточной Монголии. Улан-Батор: Изд-во МонГУ, 1982. С. 11–13.
8. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математического вычисления. М.: Мир, 1980. 280 с.
9. Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Моделирование в разведочной геофизике. М.: Недра, 1987. 192 с.
10. Канайкин В.С., Суботин А.А., Булнаев А.И. Сравнительный анализ двух методов количественной интерпретации аномалий потенциальных геофизических полей // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 2. С. 95–100.
11. Успенский Д.Г. Гравиразведка. Л.: Недра, 1968. 230 с.

References

1. Blokh Yu.I. *Interpretatsiya gravitatsionnykh i magnitnykh anomalii* [Interpretation of gravity and magnetic anomalies]. Moscow: Russian State Geological Prospecting University Publ., 2009, 230 p. (In Russian).
2. Devis Dzh. Statistics and data analysis in geology. 1977, 600 p. (Russ. ed.: Devis Dzh. *Statistika i analiz geologicheskikh dannykh*. Moscow: Mir Publ., 600 p.).
3. Nikitin A.A. *Teoreticheskie osnovy obrabotki geofizicheskoi informatsii*

[Theoretical principles of geophysical information processing]. Moscow: Nedra Publ., 1986, 337 p. (In Russian).

4. Yanovskaya T.B., Prokhorova L.N. *Obratnye zadachi geofiziki* [Inverse problems of geophysics]. Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State University Publ., 2004, 214 p. (In Russian).

5. Arvisbaatar N., Turutanov E.Kh., Buyantogtokh B., Tsendsuren D. Deep structure of Ulanbaatarsky depression by gravimetric data (Mongolia). *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2013, no. 5, pp. 53–61. (In Russian).

6. Vakhromeev G.S. *K voprosu formirovaniya fiziko-geologicheskikh modelei mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh Mongol'skoi Narodnoi Respubliki* [On formation of physico-geological models of mineral deposits of the Mongolian People's Republic]. *Voprosy geologii i metallogenii Vostochnoi Mongolii* [Problems of Geology and Metallogeny of Eastern Mongolia]. Ulan-Bator: National University of Mongolia Publ., 1979, pp. 236–244. (In Russian).

7. Dugaraa P., Arvisbaatar N. *Petroplotnostnaya kharakteristika porod Zhanchivlanskogo rudnogo uzla i ego okrestnostei* [Petro-density characteristics of rocks of the Zhanchivlansky ore cluster and its environs]. *Voprosy geologii i*

poleznykh iskopaemykh Tsentral'noi i Vostochnoi Mongolii [Problems of Geology and Minerals in Central and Eastern Mongolia]. Ulan-Bator: National University of Mongolia Publ., 1982, pp. 11–13. (In Russian).

8. Forsait Dzh., Mal'kol'm M., Mouler K. Machine methods of mathematical calculations, 1980, 280 p. (Russ. ed.: *Mashinnye metody matematicheskii vychislenii*). Moscow: Mir Publ., 1980, 280 p.

9. Vakhromeev G.S., Davydenko A.Yu. *Modelirovanie v razvedochnoi geofizike* [Modelling in exploration geophysics]. Moscow: Nedra Publ., 1987, 192 p. (In Russian).

10. Kanaikin V.S., Subotin A.A., Bulnaev A.I. Comparative analysis of two quantitative methods for potential geophysical field anomaly interpretation. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits.]. 2017, vol. 40, no. № 2, pp. 95–100. (In Russian).

11. Uspenskii D.G. *Gravirazvedka* [Gravity Prospecting]. Leningrad: Nedra Publ., 1968, 230 p. (In Russian).

Критерии авторства

Канаикин В.С., Турутанов Е.Х., Буянтогтох Б. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Kanaikin V.S., Turutanov E.Kh., Buyantogtokh B. have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.