Оригинальная статья / Original article

УДК 550.831

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-4-67-78>

РЕШЕНИЕ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ГРАВИМЕТРИИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

© 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. Лхагасурэнгийн, 42.

РЕЗЮМЕ: Цель данной статьи заключается в исследовании возможностей методов математической статистики при количественной интерпретации гравитационных аномалий. В работе использованы дисперсионный и регрессионный методы математического анализа для трансформации и инверсии гравитационного поля на примере Богдоулинского гранитоидного массива (Монголия) с аномально высоким содержанием редких и цветных металлов (олово, цинк, вольфрам). В результате получены количественные характеристики мощности массива и данные о морфологических особенностях его формы. Максимальная мощность гранитоидов составляет 12 км. Полученные оценки подтверждаются результатами решения обратной задачи гравиметрии с помощью метода подбора моделей. Таким образом, применение методов математической статистики для определения морфологии интрузивных тел позволяет получать петрофизические модели геологических объектов, совпадающие с результатами количественной интерпретации, выполненной с помощью программы полуавтоматической 3D-маркварт-инверсии гравитационного поля.

Ключевые слова: аномалия, инверсия, гранитоиды, статистический анализ, петрофизическая модель

Информация о статье: Дата поступления 24 октября 2018 г.; дата принятия к печати 27 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Канайкин В.С., Турутанов Е.Х., Буянтогтох Б. Решение обратных задач гравиметрии с помощью методов математической статистики. *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2018;41(4):67–78. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-67-78.

^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.: 8 (3952) 428792, e-mail: tur@crust.irk.ru

Evgeny Kh. Turutanov, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Head of the Laboratory of Complex Geophysics, tel.: 8 (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

SOLVING INVERSE PROBLEMS OF GRAVIMETRY BY MATHEMATICAL STATISTICS METHODS

© Viktor S. Kanaikin^a, Evgeny Kh. Turutanov^b, Bazarin 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 of Astronomy and Geophysics MAS,
42 J. Lhagaasurengiin, Ulaanbaator 13343, Mongolia

ABSTRACT: The purpose of this article is to study the possibilities of mathematical statistics methods under the quantitative interpretation of gravity anomalies. The study uses dispersion and regression methods of mathematical analysis for gravitation field transformation and inversion on example of the Bogdoulin granitoid massif (Mongolia) with the abnormally high content of rare and non-ferrous metals (Sn, Zn, W). As a result, quantitative characteristics of the massif thickness have been obtained as well as the data on the morphological features of its shape. The maximum thickness of granitoids is 12 km. The obtained estimates are confirmed by the results of solving the inverse problem of gravimetry by the method of model selection. Therefore, the application of methods of mathematical statistics for determining intrusive body morphology allows to obtain petrophysical models of geological objects coinciding with the results of quantitative interpretation performed with the use of the program of semi-automatic 3D-Markquardt-inversion of the gravitational field.

Keywords: anomaly, inversion, granitoids, statistical analysis, petrophysical model

Information about the article: Received October 24, 2018; accepted for publication November 27, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Kanaikin V.S., Turutanov E.H., Buyantogtokh B. Solving inverse problems of gravimetry by mathematical statistics methods. *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;41(4):67–78 (In Russ.). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-67-78.

Введение

Количественная интерпретация гравитационных данных предполагает использование различных способов обработки исходных материалов. В частности, при интерпретации потенциальных геофизических полей вполне возможно применение методов регрессионного и дисперсионного анализов. Эффективность применения этих методов для количественной интерпретации гравитационных данных зависит от сложности геологического строения изучаемого района, то есть и от структуры гравитационного поля [1, 2].

В работе рассматриваются возможности использования аппарата дисперсионного и регрессионного анализов математической статистики для транс-

формации и инверсии гравитационного поля Богдоулинского гранитного массива (Монголия) с целью оценки особенностей его формы и размеров, поскольку эти данные могут быть использованы при инженерно-сейсмологических работах по уточнению сейсмической опасности отдельных участков города Улан-Батора [3, 4]. Кроме того, породы массива обладают аномально высоким содержанием редких и цветных металлов (олово, цинк, вольфрам). Следовательно, изучение геологического строения этого объекта вызывает закономерный интерес не только с научной, но и с практической точки зрения.

Методы исследования

Горстовая блоковая структура массива Богдоул расположена в централь-

ной части Хэнтэйского свода Монголо-Забайкальской (Хангай-Хэнтэйской) складчатой системы Монголии [5]. Столь крупная плотностная неоднородность может оказать заметное влияние на уровень сейсмичности района [6], поэтому изучение формы и размеров Богдоулинского гранитного массива, глубинная геометрия которого до сих пор плохо изучена, представляет собой актуальную задачу.

Для изучения морфологии Богдоулинского массива авторами проведена крупномасштабная гравиметрическая съемка масштаба 1:100000. Работы выполнены с помощью гравиметров CG-5 по стандартной методике [4]. Высоты пунктов наблюдения определялись приборами Trimble 5700 GPS. Площадь гравиметрической съемки составила 1150 км². Выставлено 178 координатных пунктов наблюдения. Точность гравиметрических наблюдений рядовых координатных пунктов равна $\pm 0,02$ мГал, точность определения высот на них составила $\pm 0,35$ м, точность вычисления аномалии Буге –

$\pm 0,073$ мГал. Поправка на гравитационное влияние рельефа учтена в радиусе 200 км. По результатам гравиметрической съемки авторами построена схема аномалий Буге (рис. 1).

Средняя плотность гранитоидов массива по данным результатов многочисленных денситометрических измерений [5, 7] составляет 2520 кг/м³. Вмещающие породы фундамента представлены в основном нижнекарбовыми и средневерхнедевонскими песчаниками, сланцами и алевролитами. Величина плотности коренных пород с учетом подстилающих их гранитоидов принимается по источнику [5] и в среднем равна 2630 кг/м³.

Для исследования возможностей применимости математической статистики при интерпретации гравитационных аномалий от интрузивных тел использованы дисперсионный и регрессионный методы анализа с целью трансформации и инверсии гравитационного поля Богдоулинского гранитного массива.

Рис. 1. Схема аномалий Буге Богдоулинского гранитного массива:

1 – выходы гранитов Богдоулинского массива; 2 – изоаномалы силы тяжести, мГал

Fig. 1. Diagram of the Bouguer anomalies of the Bogdoulin granite massif:

1 – manifestations of Bogdoulin massif granites; 2 – gravity isoanomalies, mGal

Региональный фон $\Delta G^{\text{фон}}$ и локальные (остаточные) аномалии силы тяжести $\Delta G^{\text{лок}}$ получены в результате использования метода главных компонент (principal component analysis – PCA) дисперсионного анализа. Именно эти компоненты характеризуют структуру и наибольшую дисперсию (энергию) гравитационного поля. С этой целью исходное поле аномалий силы тяжести оцифровано и представлено двумерным массивом ΔG в виде матрицы с размерностью $N \times M$, где первый сомножитель соответствует числу пикетов, а второй – количеству профилей наблюдения на исследуемом участке ($N = 25$; $M = 15$). На основе этого массива данных согласно источникам [1, 2, 8] рассчитана ковариационная матрица исходных данных, изучение внутренней структуры которой позволяет вычислить главные компоненты гравитационного поля и провести их физико-геологическое истолкование для установления главной причины (источника) существования аномального поля. Принято считать, что первая главная компонента,

как правило, связана с региональной составляющей поля силы тяжести [2].

Для выявления первой главной компоненты гравитационного поля рассчитаны осредненные величины энергетических сигналов фоновой (рис. 2, 4) и локальной (рис. 3, 4) его составляющих:

$$G_i^{\text{фон}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{\Delta g_{i,j}^{\text{фон}}}{M};$$

$$G_i^{\text{лок}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{\Delta g_{i,j}^{\text{лок}}}{M},$$

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 и локального гравитационного поля на i -м пикете j -го профиля.

Из рис. 4, на котором представлены интенсивность и характер изменения региональной и локальной (остаточной) составляющих гравитационного поля, видно, что площадь, ограниченная графиком регионального фона и некой горизонтальной прямой, значительно меньше, чем подобная ей площадь,

Рис. 2. Схема регионального фона гравитационного поля Богдоулинского гранитного массива $\Delta G^{\text{фон}}$:

1 – интерпретационный профиль; 2 – изоаномалы силы тяжести, мГал

Fig. 2. Diagram of the regional background of the Bogdoulin granite massif gravitation field $\Delta G^{\text{фон}}$:

1 – interpretation profile; 2 – gravity isoanomalies, mGal

Рис. 3. Схема локальной (остаточной) аномалии Буге Богдоулинского гранитного массива $\Delta G^{лок}$:

1 – выходы гранитов Богдоулинского массива; 2 – интерпретационный профиль;
3 – изоаномалы силы тяжести, мГал

Fig. 3. Diagram of the local (residual) Bouguer anomaly of the Bogdoulin granite massif ΔG^{loc} :

1 – manifestations of the Bogdoulin massif granites; 2 – interpretation profile;
3 – gravity isonomalies, mGal

ограниченная графиком локальной аномалий силы тяжести. Это однозначно свидетельствует о неравноценности вкладов двух составляющих в суммарную дисперсию (энергию) исходного гравитационного поля и позволяет утверждать, что первая главная компонента аномального поля связана с локальной составляющей, а не с региональным фоном. Установление такой зависимости решает основную проблему дисперсионного анализа: выявление факта того, что главным объектом интерпретации является сам гранитный массив, особенности его формы и размеров, а не совокупность плотностных неоднородностей земной коры района исследований.

С целью определения особенностей глубинного строения Богдоулинского массива вдоль интерпретационного

профиля А-А (см. рис. 3) согласно данным Г.С. Вахромеева и др.¹ сформирована петрофизическая модель. Протяженность выходов гранитного массива вдоль линии интерпретационного профиля А-А, проходящего через эпицентр гравитационной аномалии, составляет 25000–28000 м. Ширина выходов геологического тела изменяется в пределах 15000–18000 м, то есть исследуемый объект в плане имеет форму эллипса. Результаты количественной интерпретации, выполненной с помощью программы полуавтоматической 3D-маркварт-инверсии гравитационного поля при аппроксимации тел ограниченными по простиранию горизонтальными призмами с вертикальными сечениями, имеющими форму многоугольников [9], позволяют считать, что вертикальная мощность массива

¹ Вахромеев Г.С., Ерофеев Л.Я., Канайкин В.С., Номоконова Г.Г. Петрофизика: учебник для вузов. Томск: Изд-во Томского университета, 1997. 460 с. / Vakhromeev G.S., Erofeev L.Ya., Kanaikin V.S., Nomokonova G.G. Petrophysics. Tomsk: Tomsk University Publ., 1997. 460 p.

Рис. 4. Схема физико-геологической модели Богдоулинского гранитного массива вдоль интерпретационного профиля А-А:

а – составляющие гравитационного поля: 1 – график локальной аномалии $\Delta G^{\text{лок}}$, 2 – график модельного поля ΔG петрофизической модели, 3 – график регионального фона модели $\Delta G^{\text{фон}}$, 4 – «энергия» сигнала регионального фона, 5 – «энергия» сигнала остаточной гравитационной аномалии; б – петрофизическая модель гранитного массива

Fig. 4. Diagram of the physico-geological model of the Bogdoulin granite massif along the interpretation profile A-A:

а – gravitation field components: 1 – graph of the local anomaly $\Delta G^{\text{лок}}$, 2 – graph of the model field ΔG of the petrophysical model, 3 – graph of the regional background of the model $\Delta G^{\text{фон}}$, 4 – "energy" of the regional background signal, 5 – "energy" of the residual gravitational anomaly signal; б – petrophysical model of the granite massif

достигает 9000 м, а его форма близка к перевернутому эллиптическому конусу (клину).

Эти геометрические параметры приняты в качестве ограничений при формировании петрофизической модели массива, состоящей из набора прямоугольных параллелепипедов. Модель гранитного массива составлена из 48 прямоугольных параллелепипедов, расположенных в 6 слоях. Вертикальная

мощность этих тел $h = 2000$ м, горизонтальная мощность (длина) $d = 3000$ м (рис. 5). Клинообразная форма массива означает, что горизонтальные размеры параллелепипедов $2b$ (ширина) не являются постоянными – их величина изменяется в зависимости от положения параллелепипеда на профиле (центральная или периферийная часть профиля) и от глубины его залегания.

Рис. 5. Положение параллелепипедов и их геометрические параметры относительно интерпретационного профиля A-A
Fig. 5. Position of parallelepipeds and their geometrical parameters relative to the interpretation profile A-A

Инверсия гравитационного поля осуществлялась с помощью регрессионного метода математического анализа способом наименьших квадратов с применением сингулярного разложения матриц. Расчеты выполнены с помощью математического пакета MathCad с использованием подпрограмм сингулярного разложения матриц SVD [10].

Рассмотрим расчеты по интерпретационному профилю A-A, проходящему через эпицентрально-аномальную зону исследуемого района (см. рис. 3). Для этого профиля сформирована линейная математическая модель в виде системы уравнений $\Delta G^{\text{лок}} \approx B \cdot \bar{a}$, 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 параллелепипедов); n – количество пикетов на интерпретационном профиле; k – число аномалиеобразующих объектов (параллелепипедов), которыми аппроксимируется изучаемый геологический объект. Для вычисления коэффициентов b_{ij} матрицы плана B используется формула для расчета

гравитационного поля от прямоугольного параллелепипеда. Поэтому элементами этой матрицы являются значения базисных функций b_{ij} , которые соответствуют эффекту j -го прямоугольного параллелепипеда ($j = 1, \dots, k$) в i -й точке профиля ($i = 1, \dots, n$), причем избыточная плотность такой призмы принята равной 1 г/см^3 .

Для вычисления коэффициентов $\bar{a} = [a_1, \dots, a_k]$ использован алгоритм, основанный на применении сингулярного разложения матрицы [1,10]. Сингулярное разложение позволяет выбирать решения с учетом реальной точности вычислений и исходных данных путем отбрасывания элементов разложения, соответствующих сингулярным числам, то есть числам меньше заданной точности наблюдений гравитационного поля.

Необходимо отметить, что указанный способ вычислений не позволил решить обратную задачу гравиметрии с требуемой точностью за одну «итерацию». То есть расхождение геометрических параметров модели массива, полученных в результате решения обратной задачи способом наименьших квадратов

с применением сингулярного разложения матриц, с результатами, полученными с помощью 3D-маркварт-инверсии гравитационного поля, слишком велико. Причина подобного расхождения заключается в том, что при интерпретации с помощью регрессионного анализа верхние горизонты (слои) модели принимают большую отрицательную избыточную плотность. Например, в отдельных параллелепипедах верхней части модели массива она достигает $-0,30 \dots -0,35 \text{ г/см}^3$, что ведет к значительному уменьшению вертикальной мощности геологического тела (см. рис. 4). В связи с этим в данном варианте решения обратной задачи вертикальная мощность гранитного массива не превышает 6000 м. Однако реальная избыточная плотность гранитов, вычисленная по данным результатов многочисленных денситометрических измерений, находится в интервале $-0,1 \dots -0,12 \text{ г/см}^3$ [5, 7], что существенно увеличивает вертикальные размеры тела по сравнению с полученными. Вследствие этого дальнейшее решение обратной задачи было проведено методом подбора моделей, при котором на «избыточную» плотность гранитов было наложено ограничение: она не могла принимать значения менее $-0,12 \text{ г/см}^3$. С помощью варьирования «избыточной» плотностью, горизонтальными размерами (шириной) и глубиной залегания параллелепипедов нами реализовано большое количество вариантов решений прямой задачи гравиметрии. При вычислении гравитационного эффекта от прямоугольных параллелепипедов их «избыточная» плотность задавалась от 0,0 до $-0,12 \text{ г/см}^3$, ширина изменялась от 0 до 15000 м, глубина верхней кромки принимала значения от 0 до 10000 м.

В результате расчетов получены вполне удовлетворительные решения с приемлемой точностью. Среднеквадратическая невязка между локальным и модельным полем сопоставима с общей

точностью гравиметрической съемки: $\sigma \approx \pm 0,09 \text{ мГал}$. Под модельным полем в данном случае понимается результат решения прямой задачи гравиметрии для петрофизической модели с заданными геометрическими и амплитудными параметрами (избыточная плотность параллелепипедов).

Результаты интерпретации гравиметрических данных

Схематический разрез итоговой петрофизической модели Богдоулинского гранитного массива приведен на рис. 6. Геометрические размеры параллелепипедов и величины их избыточной плотности, обеспечивающие наилучшую сходимость остаточной (локальной) аномалии и модельного поля силы тяжести, приведены в табл. 1 и 2.

Судя по результатам интерпретации, Богдоулинский массив имеет сложное «клавишное» строение и представлен блоками, направления простирания которых совпадают с направлениями простирания разрывных нарушений, ограничивающих плутон. Длинная ось овала, которому подобны геологические выходы этого тела, имеет северо-западную ориентировку и совпадает с направлением глубинных разломов, которые ограничивают Богдоулинский массив с юго-запада и северо-востока. Максимальная мощность гранитов составляет 12 км (см. рис. 6, табл. 1, 2), однако интерпретация гравитационного поля с использованием полуавтоматической маркварт-инверсии оценивает эту величину в 9 км. Для интрузивных тел подобных размеров расхождение не велико, но и оно требует объяснения. Сравнивая графики регионального фона, построенные на основе метода РСА и используемые при интерпретации с помощью 3D-инверсии (см. рис. 4), можно сделать следующий вывод. При линейном графическом снятии регионального фона концы интерпретационного профиля не вышли в зоны, свободные от гравитационного влияния

Рис. 6. Схема петроплотностной модели Богдоулинского гранитного массива:
а – модель в плоскости интерпретационного разреза А-А: 1 – график локальной аномалии $\Delta G^{\text{лок}}$,
2 – график модельного поля ΔG петрофизической модели; б – модель, отражающая
объемное распределение аномалиеобразующих параллелепипедов

Fig. 6. Diagram of the petro-density model of the Bogdoulinskaya granite massif:
а – model in the plane of the interpretation section A-A: 1 – graph of the local anomaly $\Delta G^{\text{лок}}$,
2 – graph of the model field ΔG of the petrophysical model; б – model
reflecting the volume distribution of the anomaly forming parallelepipeds

гранитов, что привело к уменьшению амплитуды локальной (остаточной) аномалии и в конечном итоге к снижению мощности массива. Поскольку снятие регионального фона графическим способом в большой степени зависит от квалифика-

ции интерпретатора, то есть является субъективным, использование аппарата математической статистики при решении обратной задачи гравиметрии может быть полезным инструментом трансформации и инверсии поля силы тяжести.

Таблица 1

Значения избыточной плотности параллелепипедов

Table 1

Values of parallelepiped excess density

Глубина, км	Номер слоя	Номер параллелепипеда в слое							
		1	2	3	4	5	6	7	8
		Избыточная плотность параллелепипедов, г/см ³							
0	1	-0,05	-0,09	-0,11	-0,11	-0,09	-0,06	-0,05	0,0
2	2	-0,03	-0,07	-0,11	-0,11	-0,08	-0,04	-0,03	0,0
4	3	0,0	-0,06	-0,11	-0,11	-0,07	-0,04	-0,01	0,0
6	4	0,0	-0,06	-0,10	-0,10	-0,06	-0,03	0,0	0,0
8	5	0,0	-0,05	-0,09	-0,09	-0,05	-0,02	0,0	0,0
10	6	0,0	-0,04	-0,08	-0,08	-0,04	-0,01	0,0	0,0

Таблица 2

Глубина залегания верхней кромки и размеры параллелепипедов

Table 2

Depth of the upper edge and parallelepipeds' dimensions

Глубина, км	Номер слоя	Номер параллелепипеда в слое							
		1	2	3	4	5	6	7	8
		Ширина параллелепипедов 2b, м							
0	1	1000	4000	9000	15000	13000	8000	4000	0
2	2	600	3000	7000	11000	10000	7000	2000	0
4	3	0	2600	6000	9000	9000	6000	1200	0
6	4	0	1800	5000	7000	7000	5000	0	0
8	5	0	1000	4000	5000	5000	3600	0	0
10	6	0	600	2000	3000	3000	400	0	0

Выводы

При интерпретации потенциальных геофизических полей, в частности для трансформации и инверсии поля силы тяжести, вполне возможно применение методов регрессионного и дисперсионного анализов математической статистики. На примере рудоносного гранитного массива Богдоул, расположенного в Восточной Монголии, авторами показана эффективность использования метода главных компонент (РСА) дисперсионного анализа и метода наименьших квадратов с применением сингулярного разложения матриц регрессионного анализа

для установления главного источника гравитационной аномалии (гранитный массив) и выявления особенностей его формы и размеров. Геометрические параметры итоговой модели гранитного массива подтверждены результатами количественной интерпретации, выполненной с помощью программы полуавтоматической 3D-маркварт-инверсии гравитационного поля при аппроксимации тел ограниченными по простиранию горизонтальными призмами с вертикальными сечениями, имеющими форму многоугольников.

Библиографический список

1. Девис Дж. Статистика и анализ геологических данных: монография / пер. с англ. М.: Мир, 1977. 600 с.
2. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. М.: Недра, 1986. 337 с.
3. Геология Монгольской Народной Республики. Т. III. Полезные ископаемые / под ред. Н.А. Маринова, Р.А. Хасина, Ч. Хурц. М.: Недра, 1977. 703 с.
4. Турутанов Е.Х. Морфология мезозойских гранитных plutонов Монголии по гравиметрическим данным. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. 223 с.
5. Дугараа П., Арвисбаатар Н. Петроплотностная характеристика пород Жанчивланского рудного узла и его окрестностей // Вопросы геологии и полезных ископаемых Центральной и Восточной Монголии. Уланбаатар: Изд-во МонГУ, 1982. С. 11–13.
6. Джурик В.И., Ключевский А.В., Серебренников С.П., Демьянович В.М., Батсайхан Ц., Баяраа Г. Сейсмичность и районирование сейсмической опасности территории Монголии. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2009. 420 с.
7. Вахромеев Г.С. К вопросу формирования физико-геологических моделей месторождений полезных ископаемых Монгольской Народной Республики // Вопросы геологии и металлогении Восточной Монголии. Уланбаатар: Изд-во МонГУ, 1979. С. 236–244.
8. Канайкин В.С., Турутанов Е.Х., Буянтогтох Б. Применение регрессионного и дисперсионного анализов для интерпретации гравиметрических данных // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 1. С. 115–125.
9. Webring M. Semi-automatic Marquardt inversion of gravity and magnetic profiles // U.S. Geological Survey Open-File Report OF 85-122.
10. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. М.: Мир, 1980. 280 с.

References

1. 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.).
2. Nikitin A.A. *Teoreticheskie osnovy obrabotki geofizicheskoi informatsii* [Theoretical principles of geophysical information processing]. Moscow: Nedra Publ., 1986, 337 p. (In Russian).
3. Marinov N.A., Khasin R.A., Khurts Ch. *Geologiya Mongol'skoi Narodnoi Respubliki* [Geology of the Mongolian People's Republic]. Vol. III. *Poleznye iskopaemye* [Mineral Resources]. Moscow: Nedra Publ., 1977, 703 p. (In Russian).
4. Turutanov E.Kh. *Morfologiya mezo-zoiskikh granitnykh plutonov Mongolii po gravimetricheskim dannym* [Morphology of Mongolian Mesozoic granite plutons according to gravimetric data]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2012, 223 p. (In Russian).
5. 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]. Ulanbaatar: National University of Mongolia Publ., 1982, pp. 11–13. (In Russian).
6. Dzhurik V.I., Klyuchevskii A.V., Serebrennikov S.P., Dem'yanovich V.M., Batsaikhan Ts., Bayaraa G. *Seismichnost' i*

raionirovanie seismicheskoi opasnosti territorii Mongolii [Seismicity and seismic hazard zoning of Mongolian territory]. Irkutsk: Institute of the Earth's crust SB RAS Publ., 2009, 420 p. (In Russian).

7. 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]. Ulanbaatar: National University of Mongolia Publ., 1979, pp. 236–244. (In Russian).

8. Kanaikin V.S., Turutanov E.Kh., Buyantogtokh B. Application of regression and variance analyses for gravimetry data

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], 2018, vol. 41, no. 1, pp. 115–125. (In Russian).

9. Webring M. Semi-automatic Marquardt inversion of gravity and magnetic profiles // U.S. Geological Survey Open-File Report OF 85-122.

10. 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.).

Критерии авторства

Канайкин 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.