

Оригинальная статья / Original article

УДК 550.831

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-1-115-125>

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГРЕССИОННОГО И ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗОВ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

© 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. Оценка возможностей регрессионного и дисперсионного анализов при количественной интерпретации гравитационных аномалий в решении обратной задачи гравиразведки в сложных геологических условиях. **Методы.** Рассматриваются возможности использования факторного анализа и сингулярного разложения матриц при инверсии гравитационного поля Уланбаатарской впадины (Монголия), имеющей сложную геологическую структуру. **Результаты.** Получены количественные характеристики мощности рыхлых отложений исследуемой структуры и данные о морфологических особенностях погруженной части кристаллического фундамента. Уланбаатарская впадина имеет сложное блоковое строение. Поперечным поднятием фундамента она разделяется на две котловины: западную и центральную. В западной части, в зоне тектонических нарушений, выделенная котловина имеет форму овала с размерами 3×6 км с толщиной линзы осадков 100–120 м. Максимальная мощность кайнозойских отложений центральной котловины составляет 130–160 м. Полученные количественные оценки подтверждаются результатами математического моделирования при инверсии гравитационного поля исследуемой впадины с помощью аналитических методов. **Выводы.** Применение дисперсионного и регрессионного анализов при интерпретации гравитационного поля в сложных геологических условиях позволило оценить мощность рыхлых отложений и охарактеризовать морфологию поверхности фундамента Уланбаатарской впадины. Результаты инверсии поля силы тяжести с помощью рассмотренного математического аппарата совпадают с результатами вычислений аналитическими методами при решении одномерной обратной задачи для контактной поверхности (для плоского слоя), что подтверждает эффективность предложенного авторами метода интерпретации гравитационных аномалий.

Ключевые слова: количественная интерпретация гравитационного поля, факторный анализ и сингулярное разложение матриц, Уланбаатарская впадина.

Информация о статье. Дата поступления 4 декабря 2017 г.; дата принятия к печати 13 декабря 2017 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2018 г.

Формат цитирования. 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. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-115-125

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

Viktor S. Kanaikin, Associate Professor of the Department of Applied Geology, Geophysics and Geoinformation Systems, 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

APPLICATION OF REGRESSION AND VARIANCE ANALYSES FOR GRAVIMETRY DATA INTERPRETATION

© V.S. Kanaikin, E.Kh. Turutanov, B. Buyantogtokh

Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation
Institute of the Earth's crust SB RAS,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russian Federation
Institute for Astronomy and Geophysics,
42 J. Lhagaasurengiin, Ulaanbaator 13343, Mongolia

ABSTRACT. The **Purpose** of the paper is to evaluate the possibilities of regression and variance analyses in the quantitative interpretation of gravity anomalies when solving gravity inversion problem in complex geological conditions. **Methods.** The paper considers the possibilities to use a factor analysis and singular matrix decomposition under the gravity field inversion of the Ulaanbaator depression (Mongolia), which is characterized with a complex geological structure. **Results.** We have obtained the quantitative characteristics of the loose sediment thickness in the structure under investigation and the data on morphological features of the immersed part of the crystalline basement. The Ulaanbaator depression has a complicated block structure. The transverse uplift of the foundation divides it into two basins: Western and Central. In the Western part, which is the area of tectonic disturbances, the identified basin is oval in shape with the dimensions of 3×6 km and the thickness of the deposition lens of 100-120 meters. The maximum thickness of Cenozoic deposits in the Central basin is 130-160m. Obtained quantitative assessments are confirmed by the results of mathematical modeling under gravity field inversion of the studied basin with the help of analytical methods. **Conclusions.** The thickness of loose deposits has been estimated and the surface morphology of the Ulaanbaator depression basement has been described by means of regression and variance analyses under gravity field interpretation in complex geological conditions. The results of gravity field inversion by means of the considered mathematical tools coincide with the calculation results of the analytical methods when solving a one-dimensional inverse problem for a contact surface (for a flat layer), which confirms the efficiency of the proposed interpretation method of gravity anomalies.

Keywords: *quantitative interpretation of a gravity field, factor analysis and singular matrix decomposition, Ulaanbaator depression*

Article info. Received 4 December 2017; accepted for publication 13 December 2017; available online 30 March 2018.

For citation. Kanaikin V.S., Turutanov E.H., 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). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-115-125

Введение

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

[1, 2]. Поэтому на основе материалов, изложенных в статье [3], в рамках данной публикации рассматриваются возможности использования аппарата дисперсионного и регрессионного анализов для инверсии гравитационного поля Уланбаатарской впадины с целью оценки мощности заполняющих ее осадочных отложений. Впадина имеет сложное геологическое строение: ее структура осложнена наличием двух мульдообразных котловин, разделенных поперечным поднятием фундамента.

Средняя плотность рыхлых отложений принята по данным результатов многочисленных денситометрических измерений и составляет 2100 кг/м^3 [3].

Вмещающие впадину породы Хэнтэйской серии представлены в основном нижнекарбовыми песчаниками и алевролитами. Величина плотности коренных пород принимается равной 2700 кг/м^3 .

Материалы и методы исследования

Схема исходного гравитационного поля Уланбаатарской впадины приведена на рис. 1. На основе анализа харак-

тера гравитационного поля можно отметить, что форма поля достаточно сложная: фиксируются как минимум две аномалии силы тяжести: одна – в западной, вторая – в центральной части впадины. Наблюдаемая заливообразная аномалия в западной части располагается на площади сплошного развития речных отложений. Наиболее интенсивная аномалия силы тяжести четырехугольной формы расположена в центральной части впадины [3]. Максимальная амплитуда перепада гравитационного поля на данном участке составляет 14 мГал. Выделение локальных аномалий в

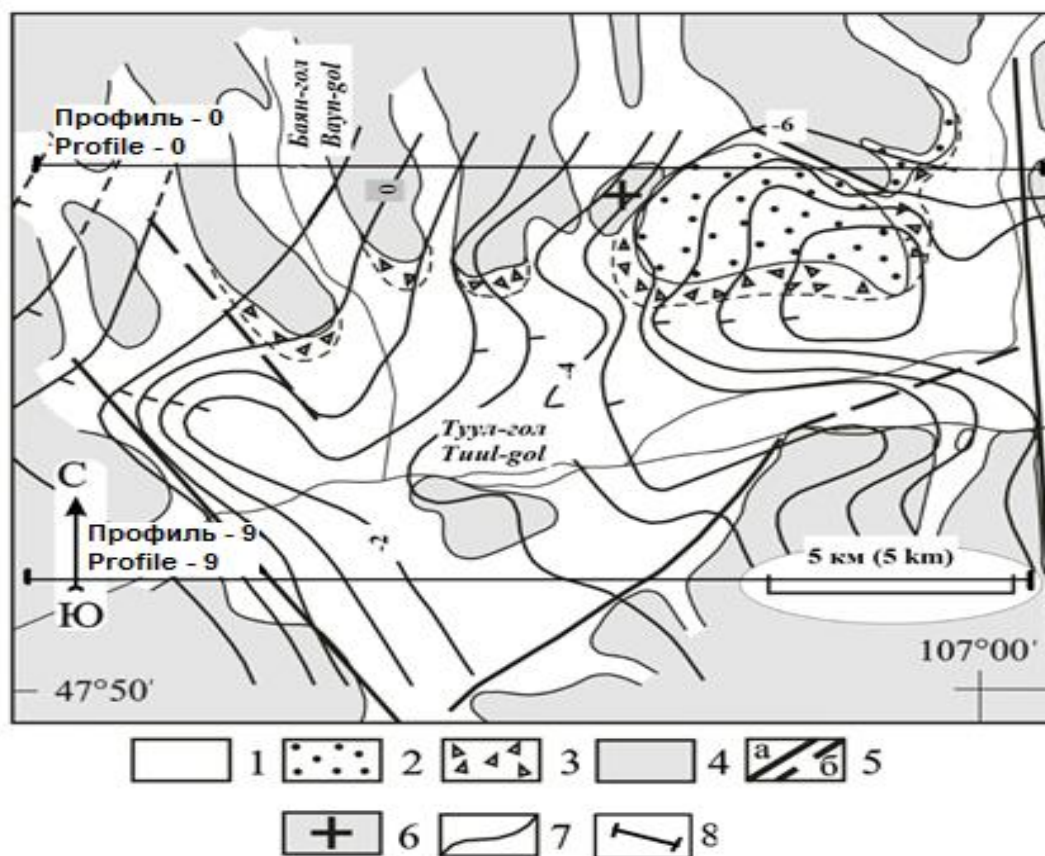


Рис. 1. Схема аномалий Буге Уланбаатарской впадины (в относительном уровне, сечение через 1 мГал):

- 1 – четвертичные отложения; 2 – неогеновые отложения; 3 – пролювиальные отложения Q;
4 – докайнозойские породы; 5 – разломы: а – выделенные, б – предполагаемые;
6 – палеозойские граниты; 7 – изоаномалы силы тяжести, мГал;
8 – интерпретационные профили

Fig. 1. Diagram of the Bouguer anomalies of the Ulaanbaatar depression (at a relative level, section in 1 mGal):

- 1 – Quaternary sediments; 2 – Neogene deposits; 3 – proluvial deposits Q;
4 – Pre-Cenozoic rocks; 5 – faults: a – identified, b – alleged;
6 – Paleozoic granites; 7 – gravity isoanomalies, mGal; 8 – interpretation profiles

чистом виде с целью их дальнейшей количественной интерпретации достаточно сложно, для этого необходимо рассчитать региональный фон гравитационного поля и ввести соответствующие поправки в исходное поле.

Для расчета регионального поля и выделения локальных аномалий использован аппарат дисперсионного анализа, а именно метод главных компонент [4, 5]. Как факторный, так и компонентный анализ базируется на изучении внутренней структуры ковариационной матрицы исходных данных. Это изучение включает: нахождение собственных значений и собственных векторов матрицы; вычисление линейных комбинаций исходных величин с собственными векторами; оценку числа основных, независимых векторов; физическое или геологическое истолкование факторов и главных компонент.

Как показали специальные исследования [5], наибольший интерес представляют две первые главные компоненты, именно они характеризуют структуру и наибольшую дисперсию (энергию) анализируемого поля. Принято считать, что первая главная компонента при обработке гравитационного поля, как правило, связана с региональной составляющей анализируемого поля.

Для реализации этого этапа исходное гравитационное поле было оцифровано и представлено для дальнейшей обработки в виде двумерного массива ΔG размерностью $n \times m$, где $n = 10$ профилей, $m = 64$ пикета. На основе этой матрицы ΔG рассчитывается ковариационная матрица K размерностью $n \times n$. Анализ ковариационной матрицы позволяет вычислить главные независимые факторы и далее рассчитать значение и характер регионального фона $\Delta G_{рег}$. Методика подобной обработки описывается в источниках [4–6].

Результаты расчета регионального фона для первой главной компоненты показаны на рис. 2. Разность между исход-

ным полем и региональным фоном дает локальную аномалию: $\Delta G_{лок} = \Delta G - \Delta G_{рег}$ (рис. 3). Форма поля, соответствующего региональному фону, носит характер, близкий к линейному. Об этом свидетельствуют и вид графиков фоновых значений поля по второму и пятому интерпретационному профилю (рис. 4). Характер регионального фона и локальных аномалий не противоречит геологическому строению изучаемого участка, что косвенно подтверждает возможность использования факторного анализа.

На схеме (см. рис. 3) отчетливо видно наличие двух локальных аномалий, поэтому задачей следующего этапа обработки является решение обратной задачи с целью определения мощности кайнозойских осадков этих аномалеобразующих тел.

Решение обратной задачи для этих аномалий осуществлено с использованием регрессионных методов [7, 8]. Количественные вычисления выполнены для всей площади исследования, т. е. по всем 10 профилям. Более подробно рассмотрим расчеты по двум профилям: первому профилю, проходящему через центральную аномальную зону, и пятому профилю, проходящему через западную аномалию. Длина каждого профиля – около 20000 м.

На базе методики интерпретации, основанной на применении регрессионного анализа, для каждого профиля сформированы линейные математические модели в виде системы уравнений $\Delta G_{лок} \approx B \cdot \bar{a}$, где B – матрица плана размерностью $m \times k$, $\bar{a} = [a_1, \dots, a_k]$ – вектор-столбец определяемых коэффициентов (в нашем случае это значение избыточных плотностей прямоугольных призм), $m = 64$ – количество пикетов на профиле; k – число прямоугольных призм, которыми аппроксимирован изучаемый геологический разрез. Этот параметр может изменять свое численное значение, но не может быть больше m [6].

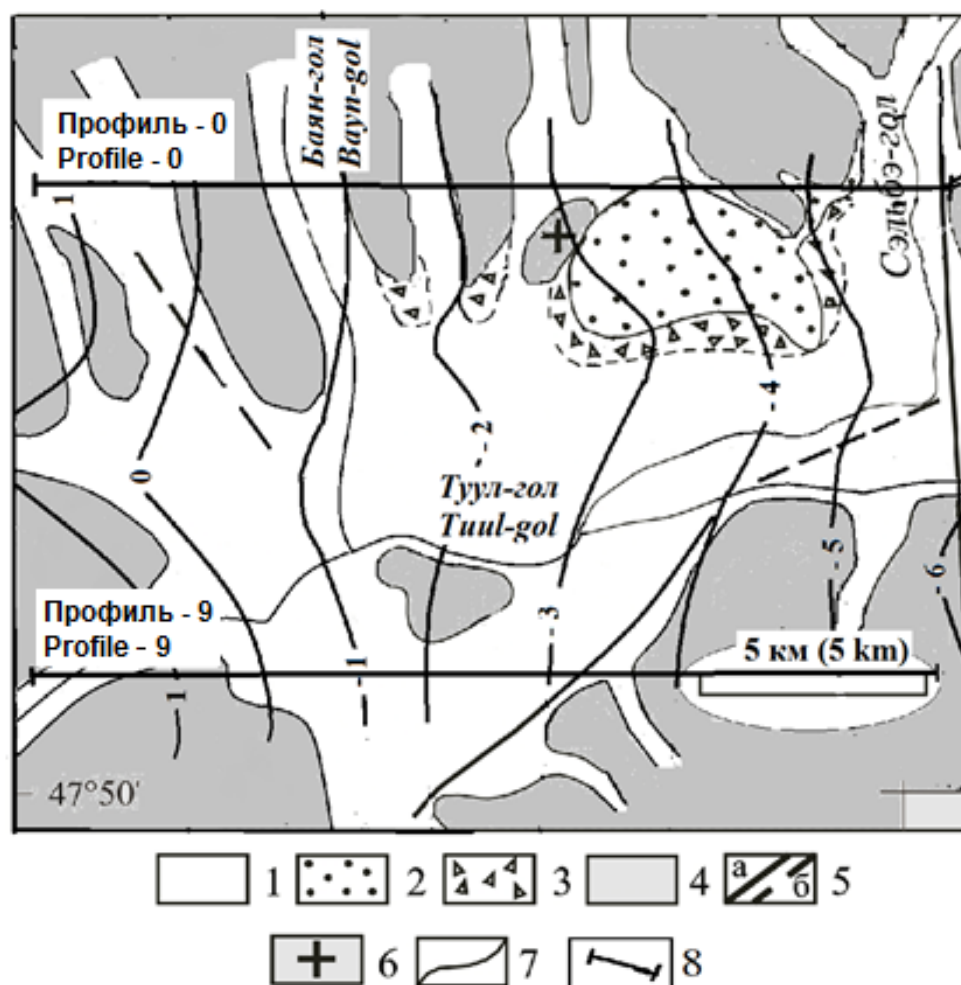


Рис. 2. Схема регионального фона Уланбаатарской впадины
(в относительном уровне):

- 1 – четвертичные отложения; 2 – неогеновые отложения; 3 – пролювиальные отложения Q;
4 – докайнозойские породы; 5 – разломы: а – выделенные, б – предполагаемые;
6 – палеозойские граниты; 7 – изоаномалы силы тяжести регионального фона, мГал,
8 – интерпретационные профили

Fig. 2. Diagram of the regional background of the Ulaanbaatar basin
(at a relative level):

- 1 – Quaternary sediments; 2 – Neogene deposits; 3 – proluvial deposits Q;
4 – Pre-Cenozoic rocks; 5 – faults: a – identified, b – alleged; 6 – Paleozoic granites;
7 – isoanomaly of gravity of the regional background, mGal, 8 – interpretation profiles

Наиболее распространенный способ определения коэффициентов $\bar{a} = [a_1, \dots, a_k]$ основан на методе наименьших квадратов [8, 9], но он требует обращение матрицы B . Как известно, эта процедура очень чувствительна к ошибкам вычислений и измерений входных и выходных переменных. Поэтому был использован более надежный алгоритм вычисления искомых коэф-

фициентов, основанный на применении сингулярного разложения матрицы [6, 7]. Сингулярное разложение позволяет выбирать решения с учетом реальной точности вычислений и исходных данных путем отбрасывания элементов разложения, соответствующих сингулярным числам σ , значение которых меньше заданной точности наблюдений гравитационного поля данной съемки τ . Эта операция

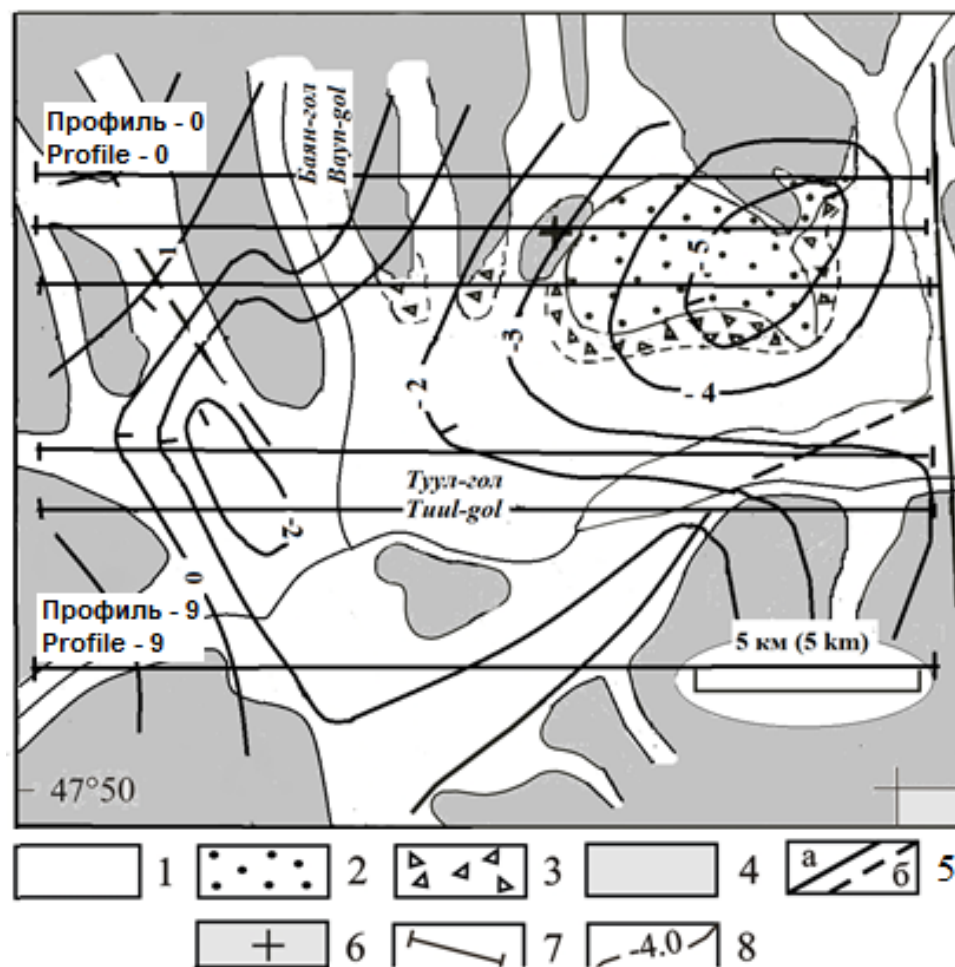


Рис. 3. Схема локальных аномалий Уланбаатарской впадины (в относительном уровне):

- 1 – четвертичные отложения; 2 – неогеновые отложения; 3 – пролювиальные отложения Q;
4 – докайнозойские породы; 5 – разломы: а – выделенные, б – предполагаемые;
6 – палеозойские граниты; 7 – интерпретационные профили;
8 – локальные аномалии силы тяжести $\Delta G_{\text{лок}}$, мГал

Fig. 3. Diagram of local anomalies of the Ulaanbaatar depression (at a relative level):

- 1 – Quaternary sediments; 2 – Neogene deposits; 3 – proluvial deposits Q;
4 – Pre-Cenozoic rocks; 5 – faults: a – identified, b – alleged; 6 – Paleozoic granites;
7 – interpretation profiles; 8 – local anomalies of gravity $\Delta G_{\text{лок}}$, mGal

дает возможность более достоверного определения коэффициентов $\bar{a} = [a_1, \dots, a_k]$ благодаря уменьшению числа обусловленности матрицы B . При этом, как правило, невязка между наблюдаемым и «модельным» гравитационным полем возрастает, но надежность получающегося регуляризованного решения (избыточные плотности призм) с избытком оправдывает эту потерю [6, 7].

Решение линейной обратной задачи гравиразведки заключается в определении морфологии геологического разреза. Для этого необходимо аппроксимировать изучаемый геологический разрез набором правильных геометрических тел. Геологическая структура в районе первого профиля была представлена в виде 32 горизонтальных прямоугольных призм ($k = 32$), что соответствует четырем

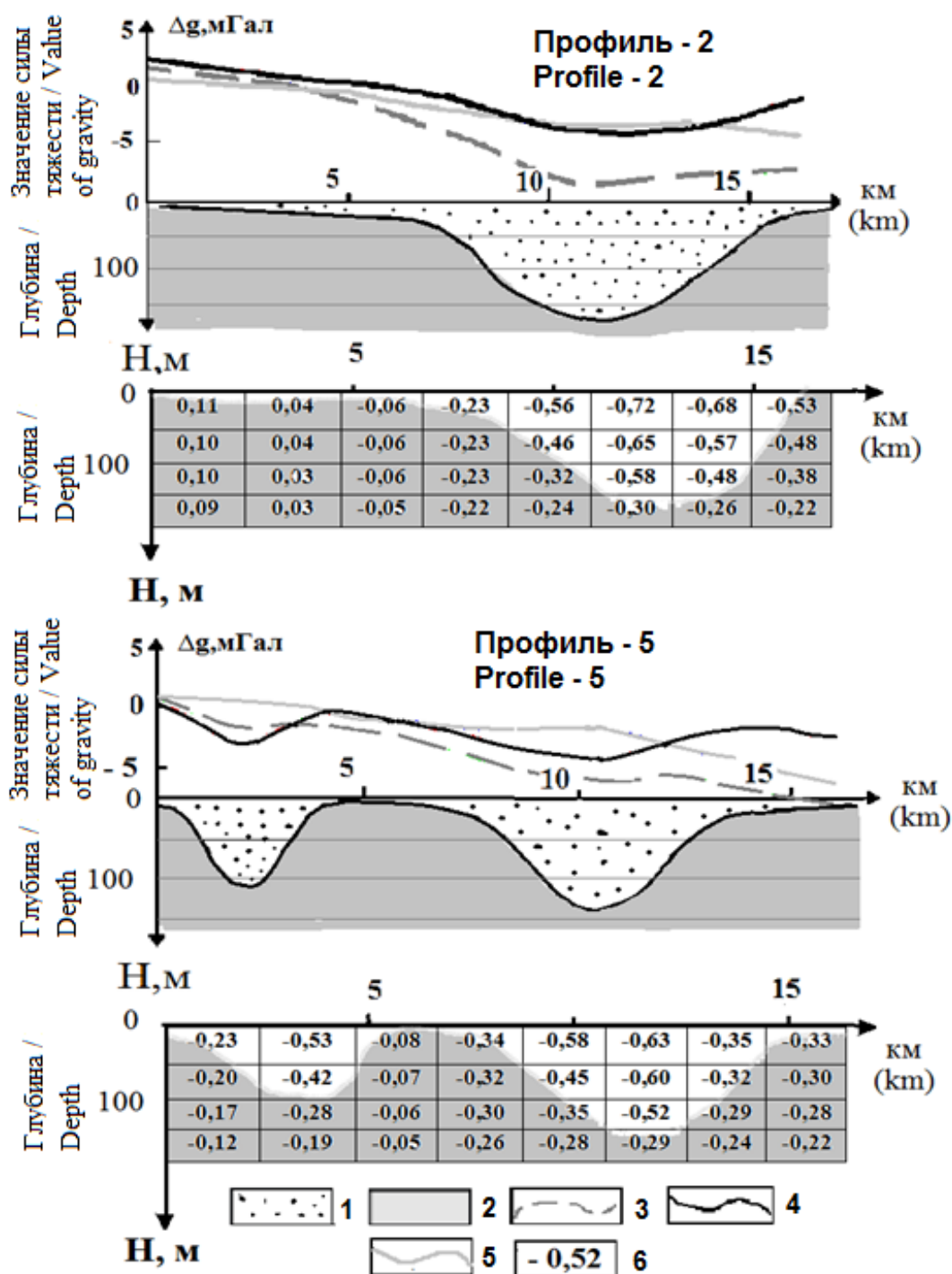


Рис. 4. Интерпретационные разрезы Уланбаатарской впадины:

1 – осадочные отложения; 2 – вмещающие породы; 3 – графики силы тяжести исходного поля ΔG в редукции Буге, мГал; 4 – графики локальных аномалий силы тяжести; 5 – графики регионального фона $\Delta G_{\text{рег}}$; 6 – избыточные плотности прямоугольных призм, г/см³

Fig. 4. Interpretation sections of the Ulaanbaatar depression:

1 – sedimentary deposits; 2 – host rocks; 3 – gravity graphs of the initial field ΔG in the Bouguer reduction, mGal; 4 – graphs of local gravity anomalies; 5 – graphs of the regional background $\Delta G_{\text{рег}}$; 6 – excess densities of rectangular prisms, g/cm³

слоям по восемь призм в каждом слое (см. рис. 4) [7, 9]. Размеры каждой призмы приняты следующие: горизонтальная мощность – 2500 м, вертикальная – 50 м. Для 64 точек профиля ($m = 64$) и 32 базисных функций ($k = 32$) была рассчитана матрица плана B . Каждый элемент $b_{m,k}$ этой матрицы выражает эффект k -й прямоугольной призмы ($k = 1, \dots, 32$) в m -й точке профиля ($m = 1, \dots, 64$), причем плотность такой призмы принята равной 1. Применение дополнительного элемента $b_{m,33} = 1$ позволяет включить в число определяемых параметров не только избыточную плотность призм, но и неизвестный уровень «остаточного» нормального поля по интерпретируемому профилю, другими словами, этот элемент позволяет учитывать различные ошибки, связанные с выбором интерпретационной модели, точностью исходных данных и вычислительных процедур. Численное значение этого элемента должно быть близким к точности гравиметрической съемки среднего масштаба.

Расчеты выполнены с помощью математического пакета MathCad с использованием подпрограмм сингулярного разложения матриц SVD. На примере первого интерпретационного профиля рассматриваемая матрица плана B характеризуется большим числом обусловленности $\sigma_1 = 12,83$; $\sigma_{32} = 0,0000179$. Приемлемое решение получено при значении $\sigma > \sigma_1 \cdot \tau = 12,83 \cdot 0,05 = 0,64$, что соответствует 5 % точности полевых работ и использованию первых восьми сингулярных чисел [6, 7]. В этом случае избыточные плотности (коэффициенты при 1–32-й базисных функциях) близки к отрицательной избыточной плотности осадочных отложений, равной $-0,4 \dots -0,6$ г/см³ (см. рис. 4). Коэффициент при 33-й базисной функции равен «остаточному фоновому» значению гравитационного поля и составляет $-0,54$ мГал, что близко к точности гравиметрической съемки данного масштаба.

Отметим, что изменение числа призм в слое до 16 с горизонтальной мощностью по 1250 м не приводит к значительному изменению решения. Увеличение количества слоев, т. е. увеличение мощности аномалеобразующего объекта, приводит к уменьшению избыточной плотности призм. Поэтому, изменяя число и геометрические размеры призм, можно аппроксимировать различные по объему геологические объекты. Средняя плотность рыхлых отложений принята по данным результатов многочисленных денситометрических измерений [3] и составляет 2100 кг/м³. Величина плотности коренных пород принимается по источнику [3] и равна 2700 кг/м³.

Аналогичные вычисления выполнены по пятому интерпретационному профилю. Исходя из того, что амплитуда западной аномалии значительно меньше амплитуды центральной, ее интерпретационная модель в западной части профиля имеет вертикальную мощность не 200 м (четыре слоя призм), а всего – 150 м (три слоя). Это позволяет увеличить избыточную плотность призм, составляющих аномалеобразующее тело, до значений $-0,4 \dots -0,6$ г/см³ (см. рис. 4).

Результаты интерпретации гравиметрических данных

Результаты интерпретации гравитационных аномалий отражены на схеме регионального фона Уланбаатарской впадины (см. рис. 2), схеме локальных аномалий (см. рис. 3), на интерпретационных разрезах (см. рис. 4) и схеме изопахит осадочных отложений (рис. 5).

На основе анализа схемы регионального фона Уланбаатарской впадины можно отметить, что характер фоновое гравитационное поле исследуемого участка близок к линейному. Вычитая из исходного поля силы тяжести региональный фон, можно получить локальные гравитационные аномалии. Интенсивность локальных отрицательных аномалий для исследуемого участка доходит до -7 мГал,

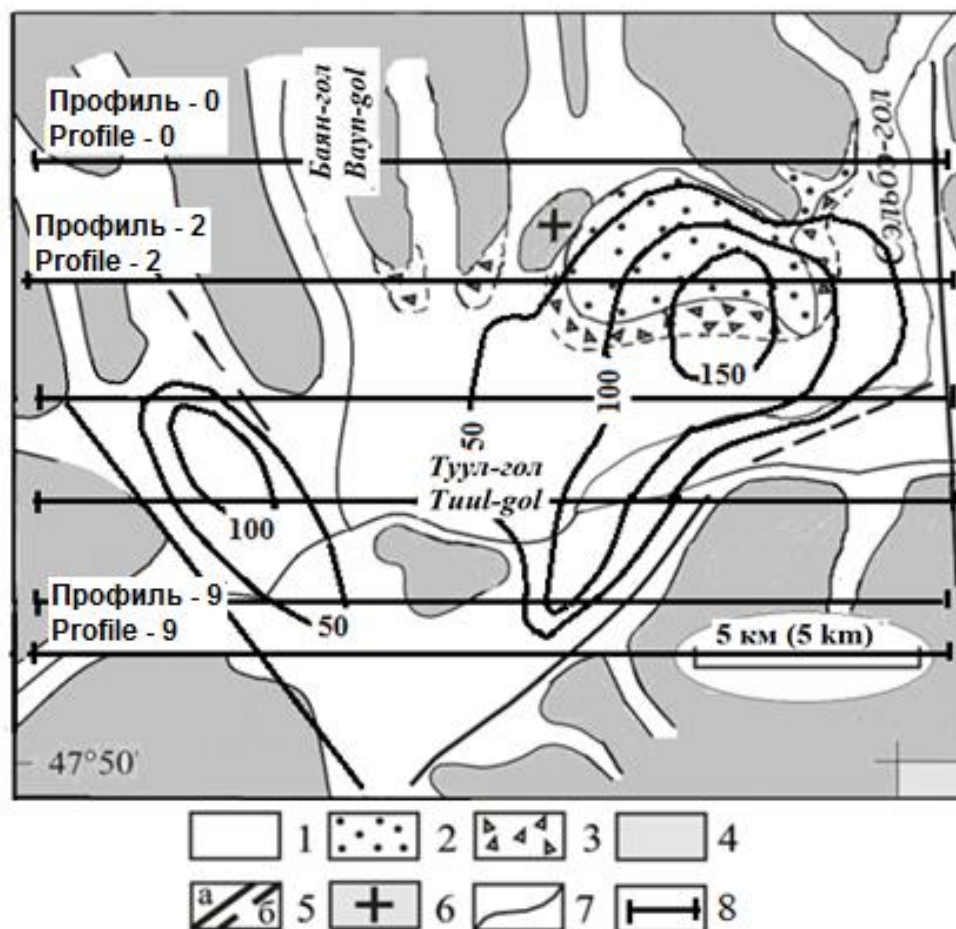


Рис. 5. Схема изопакит осадочных отложений Уланбаатарской впадины:

- 1 – четвертичные отложения; 2 – неогеновые отложения; 3 – пролювиальные отложения Q;
4 – докайнозойские породы; 5 – разломы: а – выделенные, б – предполагаемые;
6 – палеозойские граниты; 7 – изопакиты осадочных отложений, м;
8 – интерпретационные профили

Fig. 5. Diagram of Ulaanbaatar depression sedimentary deposit isopachytes:

- 1 – Quaternary sediments; 2 – Neogene deposits; 3 – proluvial deposits Q;
4 – Pre-Cenozoic rocks; 5 – faults: a – identified, b – alleged; 6 – Paleozoic granites;
7 – isopachytes of sedimentary deposits, m; 8 – interpretation profiles

что полностью соответствует оценкам, проведенным в работе [3]. В целом характер регионального гравитационного фона и локальных аномалий по своей интенсивности и по морфологии не противоречит геологическому строению изучаемого участка, что косвенно подтверждает возможность использования факторного анализа для выделения регионального фона с целью решения задач структурной геологии.

Применение факторного анализа не исключает возможности некоторых

искажений в расчете регионального фона, а следовательно, и выделяемых локальных гравитационных минимумов, что может быть связано с ограниченностью участка исследований, то есть с отсутствием выхода в «нормальное» поле, присутствием других локальных аномалий на границах данной площади и т. д.

Решение обратной задачи гравиразведки для локальных аномалий Уланбаатарской впадины осуществлялось методами регрессионного анализа, точнее сингулярного разложения матриц. Этот

подход требует аппроксимации изучаемого геологического разреза набором правильных геометрических тел, в нашем случае набором горизонтальных прямоугольных призм. Необходимо отметить, что использование аппарата сингулярного разложения матриц позволяет осуществлять выбор «регуляризованных» решений путем отбрасывания элементов разложения, соответствующих сингулярным числам, значение которых меньше заданной точности полевых наблюдений [6].

В результате решения линейной обратной задачи гравirazведки были получены количественные характеристики мощности рыхлых отложений этой структуры и данные о морфологических особенностях погруженной части кристаллического фундамента. Результаты интерпретации, приведенные на геофизических разрезах (см. рис. 4) и схеме изопакит осадков (см. рис. 5), свидетельствуют о том, что Уланбаатарская впадина имеет сложное геологическое строение. Фундамент ее разбит на многочисленные блоки, одним из которых впадина разделена на две котловины: западную и центральную (см. рис. 5). В западной части, в зоне тектонических нарушений, выделяется котловина в форме овала

размерами 3×6 км с толщиной осадков 100–120 м. Большая ось ее ориентирована в северо-западном направлении вдоль западного борта впадины. Максимальная мощность кайнозойских отложений центральной котловины составляет 130–160 м. Длинная ось этой котловины составляет 12 км.

Выводы

Применение дисперсионного и регрессионного анализов при интерпретации гравитационного поля в сложных геологических условиях позволило достоверно оценить мощность рыхлых отложений и охарактеризовать морфологию поверхности фундамента Уланбаатарской впадины. Установлено, что фундамент впадины имеет блоковое строение и осложнен мульдообразными прогибами. Геометрические и физические характеристики осадочной призмы хорошо совпадают с аналогичными характеристиками, полученными с использованием других методик интерпретации [3].

В связи с этим можно сделать вывод о том, что применение метода главных компонент и сингулярного разложения матриц при интерпретации гравитационного поля для сложных геологических условий возможно и достаточно эффективно.

Библиографический список

1. Яновская Т.Б., Прохорова Л.Н. Обратные задачи геофизики. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. 214 с.
2. Блох Ю.И. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. М.: Изд-во РГГРУ, 2009. 230 с.
3. 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.
4. Девис Дж. Статистика и анализ геологических данных / пер. с англ. М.: Мир, 1977. 600 с.
5. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. М.: Недра, 1986. 337 с.
6. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математического вычисления / пер. с англ. М.: Мир, 1980. 280 с.
7. Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Моделирование в разведочной геофизике. М.: Недра, 1987. 192 с.

8. Старостенко В.Н. Устойчивые численные методы решения обратных задач. М.: Недра, 1988. 250 с.

9. Успенский Д.Г. Гравиразведка. Л.: Недра, 1968. 230 с.

References

1. 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).

2. 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).

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

4. Devis Dzh. Statistics and data analysis in geology. 1977, 600 p. (Russ. ed.: Devis Dzh. *Statistika i analiz geologicheskikh dannyykh*. Moscow: Mir Publ., 600 p.).

5. Nikitin A.A. *Teoreticheskie osnovy obrabotki geofizicheskoi informatsii* [Theoretical principles of geophysical information processing]. Moscow: Nedra Publ., 1986, 337 p. (In Russian).

6. Forsythe J., Malcolm M., Moler K. Machine methods of mathematical calculations, 1980, 280 p. (Russ. ed.: *Mashinnye metody matematicheskii vychislenii*. Moscow: Mir Publ., 1980, 280 p.).

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

8. Starostenko V.N. *Ustoichivye chislennyye metody resheniya obratnykh zadach* [Stable numeric methods for solving inverse problems]. Moscow: Nedra Publ., 1988, 250 p. (In Russian).

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

Критерии авторства

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

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.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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