



## GRAVITY DATA-BASED MORPHOLOGY OF GRANITE MASSIFS IN EASTERN MONGOLIA AND FORMATION MECHANISM OF THE RELIEF ABOVE

B. Buyantogtokh <sup>1</sup>, E.Kh.Turutanov<sup>2</sup>, I.V. Buddo <sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Astronomy and Geophysics, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar 13343, Mongolia

<sup>2</sup> Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

<sup>3</sup> Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St, Irkutsk 664074, Russia

**ABSTRACT.** The areal gravity survey conducted in Eastern Mongolia to investigate morphology and deep structure of the model Mesozoic granite massifs served as the basis for the field measurements using high-precision Scintrex Autograv CG-5 gravimeters in strict accordance with accepted methods for regional gravity surveys. The elevations of gravity stations were determined using Trimble 5700 GPS instrument, thus ensuring high accuracy of the vertical positioning and minimizing the errors in gravity anomaly calculations. The accuracy of the derived Bouguer gravity anomalies, together with the density of the observation network, fully meet the technical requirements for 1:100000 surveys, which ensures data reliability and validity. A detailed Bouguer anomaly map was prepared based on the processed data. Gravity field inversion enabled three-dimensional modeling of the granite massifs. Based on the derived geometry and dimensions of the bodies, as well as considerations of isostatic uplift, it is inferred that the development of positive relief landforms is associated with the upward displacement of granite bodies along the faults whose existence and activity in Eastern Mongolia have been theoretically and experimentally proved.

**KEYWORDS:** gravity; gravimetry; granite massif; topographic relief; Eastern Mongolia

**FUNDING:** The study was supported by the Mongolian National Foundation for Science and Technology (grant No. 2022/145).



EDN: EGUSMR

### RESEARCH ARTICLE

**Correspondence:** Bazar Buyantogtokh, [buyantogtokh@iag.ac.mn](mailto:buyantogtokh@iag.ac.mn)

Received: December 18, 2025

Revised: April 10, 2026

Accepted: April 14, 2026

**FOR CITATION:** Buyantogtokh B., Turutanov E.Kh., Buddo I.V., 2026. Gravity Data-Based Morphology of Granite Massifs in Eastern Mongolia and Formation Mechanism of the Relief Above. *Geodynamics & Tectonophysics* 17 (3), 0892. doi:10.5800/GT-2026-17-3-0892

## МОРФОЛОГИЯ ГРАНИТНЫХ МАССИВОВ ВОСТОЧНОЙ МОНГОЛИИ ПО ГРАВИМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ И МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ РЕЛЬЕФА НАД НИМИ

Б. Буянтогтох<sup>1</sup>, Е.Х. Турутанов<sup>2</sup>, И.В. Буддо<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Институт астрономии и геофизики МАН, 13343, Улан-Батор, Монголия

<sup>2</sup> Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

<sup>3</sup> Сибирская школа геонаук ИрННТУ, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

**АННОТАЦИЯ.** На основе проведения площадной гравиметрической съемки в Восточной Монголии с целью изучения морфологии и глубинного строения модельных мезозойских гранитных массивов выполнены полевые измерения с использованием высокоточных гравиметров Scintrex Autograv CG-5 в строгом соответствии с установленными методиками региональной гравиметрии. Высота пунктов наблюдения определялась с помощью геодезических приборов Trimble 5700 GPS, что обеспечило высокую точность вертикальной привязки и минимизации погрешностей при вычислении гравитационных аномалий. Точность расчетов аномалий, а также плотность наблюдательной сети полностью соответствуют техническим требованиям, предъявляемым к гравиметрическим съемкам масштаба 1:100000, что обеспечивает надежность и достоверность интерпретации полученных данных. На основе обработанных материалов была составлена детальная карта аномалий Буге. Инверсия поля аномалий позволила авторам построить трехмерные модели гранитных массивов. По гравиметрическим данным форм и размеров массивов, с учетом их изостатического подъема, сделан вывод о том, что движение гранитов с образованием положительных форм рельефа происходило в результате «выдавливания» этих тел по разломам, существование и высокая интенсивность которых теоретически и экспериментально установлены в регионах Восточной Монголии.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** сила тяжести; гравиметрия; гранитный массив; топографический рельеф; Восточная Монголия

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Исследование проведено при поддержке Фонда науки и технологии Монголии (грант № 2022/145).

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование морфологии, геодинамики и вещественного состава интрузий гранитоидов является актуальным направлением как современной магматической геологии [Rare-Metal Granitoids..., 1971; Tauson, 1977; Turutanov, Zorin, 1978; Koval et al., 1982; Kovalenko et al., 1984; Kuzmin, 1985; Kozlov, 1985; Antipin, 1992; Yarmolyuk et al., 2002; Turutanov et al., 2022], так и структурной геоморфологии [Kharchenko, 2020]. Сведения о морфологии и размерах гранитных интрузивов используются не только для оценки перспектив их металлогенической специализации, но и для решения фундаментальных проблем геологии и геоморфологии – определения механизма внедрения гранитных тел в верхние части земной коры и возможных причин возникновения локальных поднятий рельефа, поэтому целесообразно применять гравиметрический метод исследований, который позволяет надежно определить форму и размеры гранитных плутонов. Эти данные без дополнительной информации о конкретном геолого-тектоническом строении региона не могут быть достаточными для решения поставленных задач.

### 2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследования находятся в юго-западной части палеозойского Хэнтэйского синклинория Хан-

гай-Хэнтэйской (Монголо-Забайкальской) складчатой системы Монголии (рис. 1).

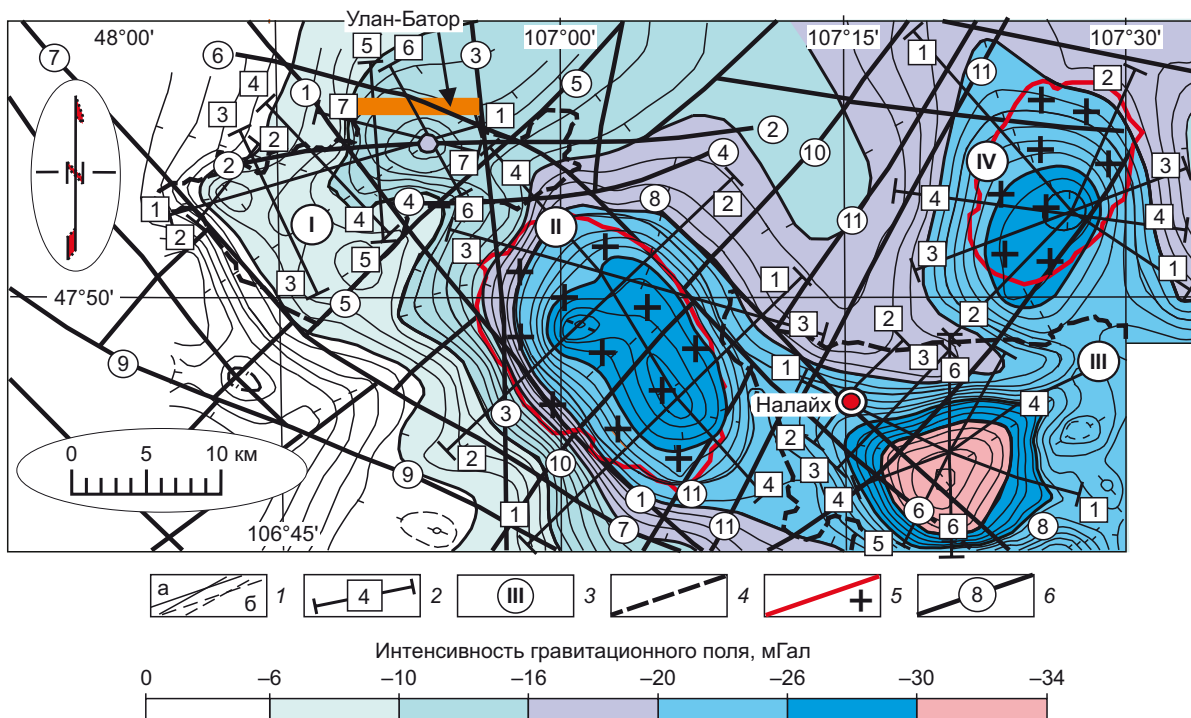
По результатам площадной гравиметрической съемки авторами получены новые данные и составлена схема гравитационных аномалий, на которой выделена полоса гравитационных минимумов силы тяжести (рис. 2).

Интенсивный гравитационный минимум в центральной части полосы пониженных значений силы тяжести полностью совпадает с выходами гранитов Богдоулинского массива и целиком ими обусловлен (рис. 2, II). В 30 км к северо-востоку от Богдоулинского плутона выявлена крупная отрицательная гравитационная аномалия, экстремальная часть которой находится в пределах выходов Горихинского гранитного массива (рис. 2, IV). Это дает основания предполагать, что данный минимум силы тяжести полностью обусловлен породами Горихинского плутона.

Указанные гранитные плутоны изучены достаточно детально комплексом геологических, геохронологических, петрологических и минералого-геохимических методов [Lisitsyn, Tsyganov, 1963; Antipin et al., 1976a, 1976b; Gerel, 1978; Vladykin et al., 1981; Khishigsuren et al., 2006a, 2006b]. Однако геофизических сведений об их объемной морфологии явно недостаточно. На основе карты аномалий силы тяжести в редукции Буге получены схемы локальных (остаточных) гравитационных



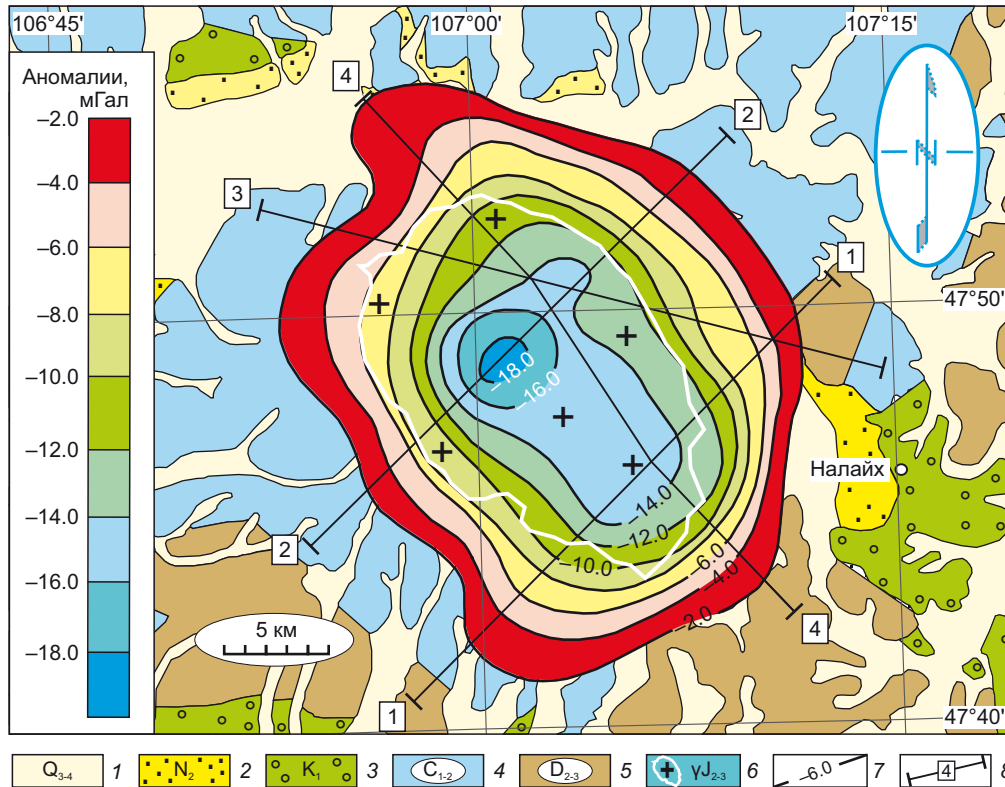
**Рис. 1.** Схема геолого-географического районирования Монголии (по [Khasin et al., 1973], с изменениями).  
 1 – граница районов. Районы (римские цифры в кружках): I – Монгольский Алтай, II – Северная Монголия, III – Хангай-Хэн-тэйский, IV – Центральная и Северо-Восточная Монголия, V – Южная Монголия, VI – Юго-Восточная Монголия; 2 – граница подрайонов; 3 – район детальных гравиметрических работ.  
**Fig. 1.** Scheme of geological and geographical zoning of Mongolia (modified after [Khasin et al., 1973]).  
 1 – boundary of areas. Areas (Roman numerals in circles): I – Mongolian Altai, II – Northern Mongolia, III – Khangai-Khentei, IV – Central and Northeastern Mongolia, V – Southern Mongolia, VI – Southeastern Mongolia; 2 – boundary of subareas; 3 – area of detailed gravimetric survey.



**Рис. 2.** Карта гравитационных аномалий (в редукции Буге) района исследований (в относительном уровне, сечение изоаномал через 1 мГал).  
 1 – изоаномалы силы тяжести, мГал: а – основные, б – дополнительные; 2 – интерпретационные профили. Цифры в квадратах – номера профилей; 3 – цифры (римские) в кружках – крупнейшие плотности неоднородности верхней части земной коры Улан-Баторского района: I – Улан-Баторская (Тольская) впадина, II – Богдуулинский гранитный массив, III – Налайхинская котловина, IV – Горихинский гранитный массив; 4 – границы осадочных отложений: I – Улан-Баторской (Туулской) впадины, III – Налайхинской котловины; 5 – выходы гранитов: II – Богдуулинского гранитного массива, IV – Горихинского гранитного массива.  
**Fig. 2.** Map of gravity anomalies (Bouguer reduction) of the study area (in relative level, section of isonoms through 1 mGal).  
 1 – isonoms of gravity, mGal: a – main, b – additional; 2 – interpretation profiles. Numbers in squares – profile numbers; 3 – numbers (Roman numerals) in circles – largest density inhomogeneities of the upper part of the Earth's crust of the Ulaanbaatar region: I – Ulaanbaatar (Tolskaya) depression, II – Bogdoulinsky granite mass, III – Nalaikhin depression, IV – Gorkhinsky granite mass; 4 – boundaries of sedimentary deposits: I – Ulaanbaatar (Tuul) depression, III – Nalaikhin depression; 5 – granite outcrops: II – Bogdoulinsky granite mass, IV – Gorkhinsky granite mass.

массива; 6 – крупные разломы, установленные по геологическим данным. Цифры (арабские) в кружках – названия разломов (по [Dzhurik et al., 2009]): 1 – Шижирбогдуулинский, 2 – Северо-Туулский, 3 – Сэлбинский, 4 – Южно-Туулский, 5 – Гацууртынский, 6 – Баянхошуунский, 7 – Сонгинуулский, 8 – Хонхоринский, 9 – Тургэнийский, 10 – Хундайский, 11 – Дэндэйская система разломов.

**Fig. 2.** Bouguer gravity anomaly map of the study area (at a relative level, contour interval of isolines is 1 mGal). 1 – isolines of gravity anomalies (mGal): a – primary, б – secondary; 2 – interpretation profiles. Numbers in squares indicate profile numbers; 3 – Roman numerals in circles indicate the largest density heterogeneities in the upper crust of the Ulaanbaatar region: I – Ulaanbaatar (Tuul) basin, II – Bogd Uul granitic massif, III – Nalaikh basin, IV – Gorkhi granitic massif; 4 – boundaries of sedimentary deposits: I – Ulaanbaatar (Tuul) basin, III – Nalaikh basin; 5 – granite outcrops: II – Bogd Uul granitic massif, IV – Gorkhi granitic massif; 6 – geologically mapped major faults. Arabic numbers in circles indicate fault names (after [Dzhurik et al., 2009]): 1 – Shijirbogd Uul fault, 2 – North Tuul fault, 3 – Selbe fault, 4 – South Tuul fault, 5 – Gatsuurt fault, 6 – Bayankhoshuu fault, 7 – Songino Uul fault, 8 – Khonkhor fault, 9 – Turgen fault, 10 – Khundai fault, 11 – Dendei fault system.



**Рис. 3.** Схема локальных (остаточных) гравитационных аномалий Богдоулинского гранитного массива (по [Buyantogtokh et al., 2015, 2019], с изменениями).

1 – аллювиально-пролювиальные отложения: глыбы, дресва, щебень, галька с суглинисто-супесчаным заполнением, делювиально-пролювиальные отложения; 2 – верхнеэоценовые-плиоценовые отложения: красноцветные, иногда желтовато-пестрые глины, алевроитовые гальки, пески, слабо цементированные брекчи, конгломераты, гравелиты, суглинки; 3 – нижний мел: песчаники с фауной и флорой, алевролиты, конгломераты, гравелиты, глины, аргиллиты; 4 – нижний – средний карбон: глинистые сланцы с прослойками разнозернистых песчаников, алевролиты, кремнистые алевролиты, редко – прослойки яшм; 5 – средний – верхний девон: желтоватые средне- и мелкозернистые песчаники, туфопесчаники, редко – линзы яшм, прослойки туффитов; 6 – среднепозднеюрский Богдоулинский гранитный массив, харалгайский комплекс: гранит-порфиры с биотитом и мусковитом, мелко- и среднезернистые граниты с биотитом и мусковитом, редко – с аляскитом, средне- и крупнозернистые порфировидные граниты с биотитом, аляскитом, иногда щелочные; 7 – изоаномалы силы тяжести, мГал; 8 – интерпретационные профили. Цифры в квадратах – номера этих профилей.

**Fig. 3.** Scheme of local (residual) gravity anomalies of the Bogd Uul granite massif (modified after [Buyantogtokh et al., 2015, 2019]). 1 – alluvial-proluvial deposits: blocks, gruss, rubble, pebbles with loamy sand infill; deluvial-proluvial deposits; 2 – Upper Neogene – Pliocene deposits: red-colored, sometimes variegated yellowish clays, silty pebbles, sands, weakly cemented breccias, conglomerates, gravelites, loams; 3 – Lower Cretaceous: sandstones with fauna and flora, siltstones, conglomerates, gravelites, clays, argillites; 4 – Lower – Middle Carboniferous: clay shales with interbeds of variable-grained sandstones, siltstones, siliceous siltstones, rare interbeds of jaspers; 5 – Middle – Upper Devonian: yellowish medium-to-fine grained sandstones, tuffaceous sandstones, rare lenses of jaspers, interbeds of tuffites; 6 – Middle – Late Jurassic Bogd Uul granite massif, Kharalgai complex: granite porphyries with biotite and muscovite, fine-to-medium grained granites with biotite and muscovite, rarely with alaskite, medium-to-coarse grained porphyritic granites with biotite, alaskite, sometimes alkaline; 7 – gravity isolines, mGal; 8 – interpretation profiles. Numbers in squares are the numbers of these profiles.

аномалий, составленные по четырем интерпретационным профилям как для Богдоулинского (рис. 3), так и для Горихинского (рис. 4) гранитного массива.

Количественная интерпретация остаточных гравитационных аномалий осуществлялась с помощью программы полуавтоматизированной инверсии аномалий силы тяжести при аппроксимации тел ограниченными по простиранию горизонтальными призмами с вертикальными сечениями, имеющими форму многоугольников [Webring, 1985].

Результаты инверсии локальных (остаточных) гравитационных аномалий вдоль интерпретационных профилей отражены на геолого-геофизических разрезах Богдоулинского и Горихинского массивов (рис. 5, 6).

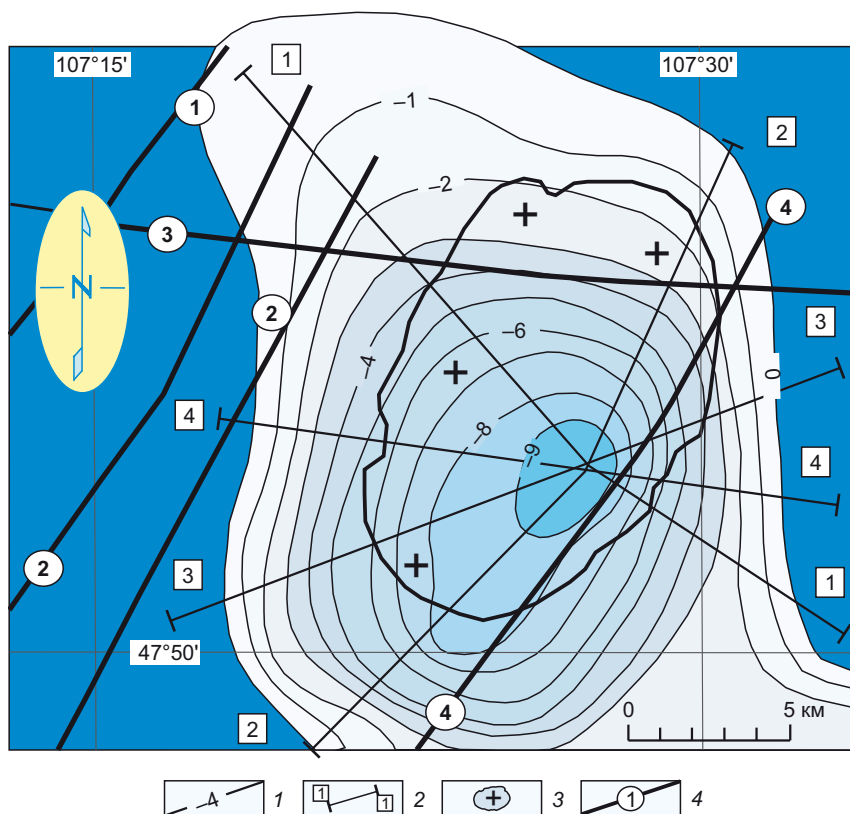
На основе изучения формы и размеров геолого-геофизических моделей мезозойских гранитных plutонов, оценки их способности к изостатическому подъему при формировании топографического рельефа и учета величин горизонтальных тектонических напряжений предпринята попытка установления возможных причин образования положительных форм топографического рельефа над ними.

### 3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 3.1. Образование малых форм «гранитного» рельефа земной поверхности

Известно, что массивам гранитов часто соответствуют положительные формы топографического рельефа над ними [Khudyakov, 1964; Lishnevsky, 1965; Solovyov, 1975; Ovander, 1975; Fedorovich, 1975; Bankwitz, 1975; Laperdin, Trzhtsinsky, 1977]. Подобная закономерность установлена в Скалистых горах США, в Центральном Казахстане, на Урале, в Средней и Восточной Сибири, на Дальнем Востоке [Thom, 1957; Lishnevsky, 1965; Trifonov et al., 1968; Ananyev, Karevskaya, 1970; Svarichevskaya, 1975; Lishnevsky et al., 1976].

Существуют в основном две точки зрения на происхождение возвышенностей, сложенных гранитами. Одна группа исследователей считает, что возвышенности, сложенные гранитами, обязаны своим происхождением процессам селективной денудации, т.е. возвышенности являются останцами пород, сохраняющимися в силу своей исключительной прочности. При этом важную роль в становлении и развитии горного рельефа, по их мнению, играет броня экзоконтактовых



**Рис. 4.** Схема локальных (остаточных) гравитационных аномалий Горихинского гранитного массива (в относительном уровне, сечение изоаномал через 1 мГал) (по [Turutanov et al., 2020], с изменениями).

1 – изоаномалы силы тяжести; 2 – интерпретационные профили; 3 – гранитоиды массива; 4 – крупные разломы, установленные по геологическим данным. Цифры (арабские) в кружках – названия разломов: 1 – Хундэйский, 2 – Дэндэйская система глубинных разломов, 3 – Северо-Горихинский, 4 – Восточно-Горихинский.

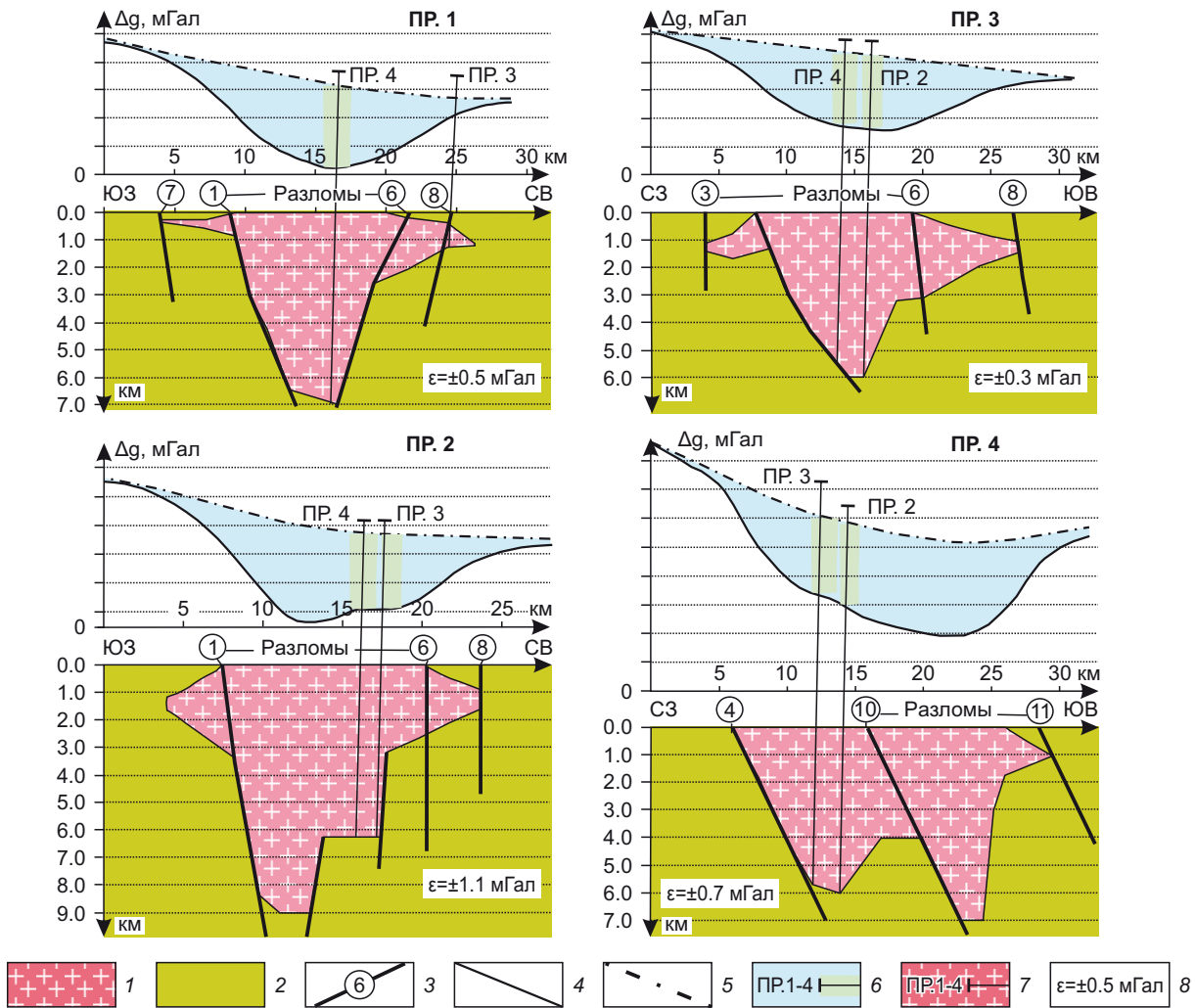
**Fig. 4.** Scheme of local (residual) gravity anomalies of the Gorkhi granite massif (at a relative level, contour interval 1 mGal) (modified after [Turutanov et al., 2020]).

1 – gravity isolines; 2 – interpretation profiles; 3 – granitoids of the massif; 4 – geologically mapped major faults. Arabic numerals in circles indicate fault names: 1 – Khundeï, 2 – Dendeï system of deep faults, 3 – North Gorkhi, 4 – East Gorkhi.

пород гранитных массивов [Solovyov, 1975; Minina, Borisov, 1975].

По мнению других, решающее значение в образовании подобных форм рельефа имеет движение гранитных массивов вверх, продолжающееся после их внедрения и застывания [Khudyakov, 1965; Lishnevsky, 1965; Marchand, 1971; Bankwitz, 1975; Pitcher, 1975; Turutanov, Zorin, 1978; Turutanov, 2014]. Причины же подобного движения могут быть различными. Иногда подъем

интрузий объясняется сравнительно неглубоким залеганием зон относительного разуплотнения, располагающихся внутри земной коры на глубине 8–14 км [Lishnevsky, 1965; Borozdin, Semakin, 1969; Lishnevsky et al., 1976]. По существу, в данном случае предполагается продолжение процесса гранитизации, приводящего к увеличению масс на глубине и, как следствие этого, к выталкиванию застывшей ранее гранитной пробки [Letnikov et al., 2000].



**Рис. 5.** Геолого-геофизические разрезы вдоль интерпретационных профилей Богдоулинского гранитного массива (по [Buyantogtoch et al., 2015, 2019]).

1 – граниты массива; 2 – вмещающие граниты породы; 3 – крупные разломы, установленные по геологическим данным; 4 – графики аномалий силы тяжести в редукции Буге; 5 – графики регионального гравитационного фона; 6 – места пересечения интерпретационными профилями гранитов и значения величины регионального гравитационного фона в этих местах; 7 – места пересечения интерпретационными профилями гранитов и значения мощностей (толщины) гранитов в этих местах; 8 – среднеквадратические погрешности подбора моделей на интерпретационных профилях, мГал. Цифры в кружках – названия разломов (по [Dzhurik et al., 2009]): 1 – Шижирбогдоулинский, 3 – Сэльбинский, 4 – Южно-Тольский, 6 – Баянхошуунский, 7 – Сонгиноульский, 8 – Хонхоринский, 10 – Хундайский, 11 – Дэндэйская система разломов.

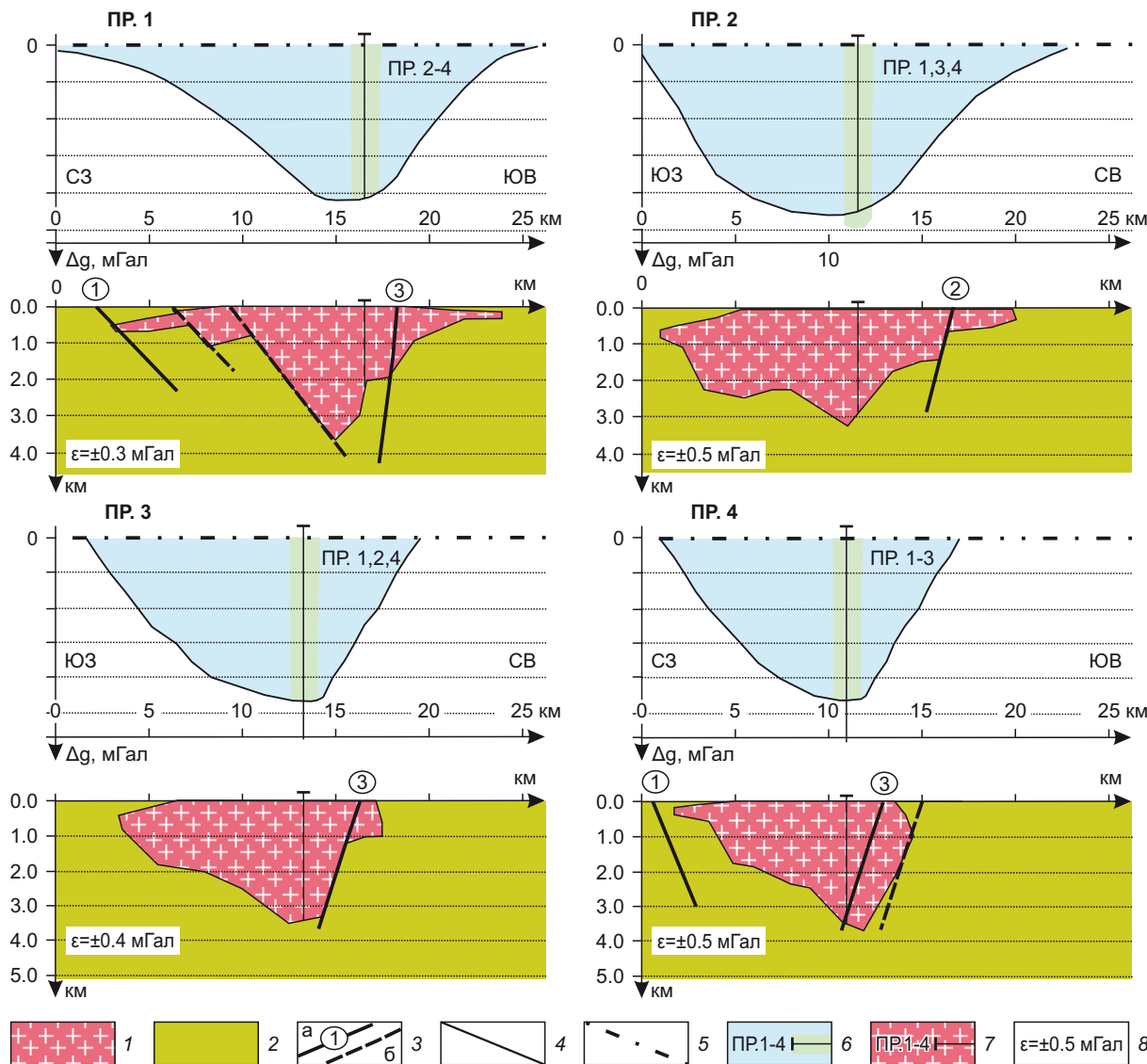
**Fig. 5.** Geological-geophysical sections along the interpretation profiles of the Bogd Uul granite massif (after [Buyantogtokh et al., 2015, 2019]).

1 – granites of the massif; 2 – granite host rocks; 3 – geologically mapped major faults; 4 – Bouguer gravity anomaly curves; 5 – regional gravitational-wave background curves; 6 – intersections of interpretation profiles with granites and granite thickness values therein; 7 – intersections of interpretation profiles with granites and granite thickness values therein; 8 – root mean square errors of model fitting on the interpretation profiles, mGal. Numbers in circles indicate fault names (after [Dzhurik et al., 2009]): 1 – Shijir Bogd Uul, 3 – Selbe, 4 – South Tuul, 6 – Bayankhoshuu, 7 – Songino Uul, 8 – Khonkhor, 10 – Khundai, 11 – Dendei fault system.

Некоторые исследователи объясняют образование положительных форм рельефа над гранитами изостатическим всплыванием последних [Willis, 1941; Korzhinsky, 1955; Vinogradov, 1959; Turner, Verhogen, 1961; Magnitsky, 1964; Khudyakov, 1965; Belousov, 1966; Pek,

1968; Shipulin, 1968; Skublova, Zailin, 1969; Patalakha, 1970; Fyfe, 1972; Tikhomirov, 1975; Turutanov, Zorin, 1978; Turutanov, 2014].

Иногда большое значение придается клиновидной форме интрузивных тел, за счет которой они могут



**Рис. 6.** Геолого-геофизические разрезы вдоль интерпретационных профилей Горихинского гранитного массива (по [Turutanov et al., 2020]).

1 – граниты массива; 2 – вмещающие граниты породы; 3 – крупные разломы: а – установленные по геологическим данным, б – предполагаемые по геофизическим данным; 4 – графики локальных (остаточных) гравитационных аномалий; 5 – графики регионального гравитационного фона; 6 – точки пересечения и значения величин регионального гравитационного фона в местах пересечения интерпретационных профилей; 7 – места пересечения интерпретационных профилей и значения мощности (толщины) гранитов в этих местах; 8 – среднеквадратические погрешности подбора моделей на интерпретационных профилях, мГал. Цифры в кружках – названия разломов: 1 – Дэндэйский, 2 – Северо-Горихинский, 3 – Восточно-Горихинский (разломы 2 и 3 определены по геологическим данным, но названий не имели. Северо-Горихинский и Восточно-Горихинский – предлагаемые авторами названия).

**Fig. 6.** Geological-geophysical sections along the interpretation profiles of the Gorkhi granite massif (after [Turutanov et al., 2020]). 1 – granites of the massif; 2 – granite host rocks; 3 – major faults: а – geologically mapped, б – geophysically inferred; 4 – local (residual) gravity anomaly curves; 5 – regional gravitational-wave background curves; 6 – regional gravitational-wave backgrounds at the intersections of interpretation profiles; 7 – interpretation profile intersections and granite thickness values therein; 8 – root mean square errors of model fitting on the interpretation profiles, mGal. Numbers in circles indicate fault names: 1 – Dendei, 2 – North Gorkhi, 3 – East Gorkhi (faults 2 and 3 were geologically mapped but remained unnamed. North Gorkhi and East Gorkhi are the names proposed by the authors).

выскальзывать по трещинам под действием тангенциальных напряжений [Thom, 1957; Trifonov et al., 1968; Svarichevskaya, Skublova, 1975].

В настоящее время геология не испытывает недостатка в количестве конкурирующих между собой концепций почти по всем разделам геодинамики. Поскольку по рассматриваемому нами вопросу, как видим, также существует ряд концепций, вряд ли стоит предлагать новые механизмы становления гранитных плутонов и образования топографического рельефа над ними, не проверив принципиальной приемлемости старых. В связи с этим одной из основных задач данного исследования является именно выбор одной из уже существующих концепций механизмов движения магматических тел вверх с образованием «малых» форм топографического рельефа.

С этой целью рассмотрим наиболее общие особенности морфологии изученных нами гранитных массивов, на основе которых постараемся выяснить, какая из существующих гипотез становления гранитных массивов с образованием положительных форм топографического рельефа над ними в наиболее полной мере соответствует этим особенностям.

### 3.2. Общие черты формы и размеров изученных гранитных массивов

Как уже говорилось, в результате геолого-геофизической интерпретации гравитационных аномалий Буге авторами получено представление о морфологии Богдоулинского и Горихинского гранитных массивов. Охарактеризуем наиболее общие черты их формы и размеров.

Оба массива представляют собой тела, вытянутые вдоль глубинных разломов (см. рис. 3, 4). При слабо варьирующейся и почти одинаковой длине массивов (20–25 км с учетом протяженности подземных частей) площади их наибольших поперечных сечений на разрезах сопоставимы и составляют 75 км<sup>2</sup> для Богдоулинского и 30 км<sup>2</sup> для Горихинского (см. рис. 5; рис. 6), то есть объем аномальных масс, приходящихся на единицу длины интрузивных тел, является величиной одного порядка. Имеются в виду разрезы, проходящие через те части плутонов, где их толщина максимальна. В этих местах толщина (вертикальная мощность) массивов изменяется от 4.0 км для Горихинского до 9.0 км для Богдоулинского и является величиной одного порядка.

Вертикальные геолого-геофизические разрезы обоих массивов имеют выраженную клиновидную форму. Подводящие каналы для них не фиксируются, обоим гранитным плутонам соответствуют положительные формы топографического рельефа над ними.

На основе полученных общих сведений о морфологии изученных нами гранитных плутонов попытаемся ответить на вопрос, может ли изостатическое всплывание уже затвердевшего интрузивного тела служить основным рельефообразующим фактором в районе того или иного массива или главной причиной этого

являются тектонические (негидростатические) силы. При этом выбранный механизм движения массивов должен обеспечивать приобретение интрузивами всех особенностей формы, установленных в результате количественной интерпретации.

Авторы полагают, что механизм движения вверх интрузивных гранитных тел является наиболее вероятным в исследуемом регионе по следующим причинам: во-первых, селективная денудация как фактор рельефообразования маловероятна, так как если исключить некоторые мономинеральные ультрабазиты, например пироксениты, то можно считать, что почти все кристаллические зернистые интрузивные породы значительно быстрее и на большую глубину поражаются агентами денудации, чем окружающие их эффузивные породы и кристаллические сланцы [Trifonov et al., 1968; Ananyev, Karevskaya, 1970; Zorina, Skublova, 1975]; во-вторых, для районов мезозойской активизации продолжение в настоящее время гранитизации на глубине 8–14 км маловероятно [Leontyev, Didenko, 1973].

Проанализируем возможности механизмов движения магматических тел вверх под действием гидростатических и тектонических сил.

**Условия «всплывания» магматического расплава.** Выясним, как установленные особенности морфологии Богдоулинского и Горихинского мезозойских гранитных массивов согласуются с возможностью их становления под действием сил, создаваемых конвективной неустойчивостью, т.е. за счет всплывания скопленных легкой магмы сквозь земную кору, которая в геологических процессах ведет себя как вязкая жидкость [Willis, 1941; Fyfe, 1972; Ushakov, Krass, 1972; Letnikov et al., 2000]. Подобный механизм становления гранитных интрузий изучен достаточно подробно [Khudyakov, 1964; Skublova, Zailin, 1969; Tikhomirov, 1975; Turutanov, Zorin, 1978; Turutanov, 2014].

Жидкие тела при всплывании в других жидкостях приобретают каплевидную форму, обеспечивающую минимальное сопротивление движению. При этом изометрическая форма интрузивов обуславливается большой вязкостью кислых магм и вмещающих их толщ [Lebedeva, 1956; Pek, 1968; Osipov, 1976; Kuznetsov, 1972], поэтому при рассмотрении процесса всплывания определенного объема гранитной магмы предположение о сферичности этого объема, видимо, является наиболее простым и довольно близким к реальному положению вещей. Линейная вытянутость интрузивов, приуроченных к разломам, обусловлена, очевидно, слиянием нескольких сферических «капель».

При всплывании шарообразного (сферического) тела сила вязкого трения определяется уравнением Стокса:

$$F = 2\pi\eta R \frac{2\eta + 3\eta'}{\eta + \eta'} \dot{Z}. \quad (1)$$

Здесь  $\eta$  – динамическая вязкость вмещающей среды;  $\eta'$  – вязкость тела;  $R$  – его радиус;  $\dot{Z}$  – скорость движения сферического тела.

Если принять вязкость вещества всплывающего тела (вязкость жидкого гранитного стекла) равной  $10^6$  П, а вязкость вмещающих пород в пределах от  $10^{17}$  до  $10^{23}$  П [Birch et al., 1949; Fyfe, 1972; Harris et al., 1972], то можно считать, что  $\eta' \rightarrow 0$ . Тогда:

$$F = 4\pi\eta R\dot{Z}. \quad (2)$$

Выполненные оценки показывают, что  $R \approx 5$  км – минимальный радиус сферического магматического тела, способного к движению вверх под действием архимедовой силы. Это пороговое значение размеров магматических скоплений (количество аномальных масс, приходящихся на единицу длины магматической камеры), которое необходимо для свободного всплывания магматической «капли». Интрузивы меньших размеров не обладают подъемной силой, необходимой для преодоления сопротивления вмещающей среды [Turutanov, 2014].

Рассмотрение коры как вязкой жидкости пригодно для описания процесса становления плутонов в целом. В деталях же процесс перемещения магмы включает в себя и частичное разрушение вмещающей среды (последовательное образование камеры выше магматической «капли»). Вызывает интерес сопоставление напряжений, создаваемых движущимся телом под действием архимедовой силы, с прочностью вмещающих кристаллических горных пород.

При постоянном недостатке плотности напряжения, развиваемые всплывающим в гравитационном поле телом сквозь более тяжелую среду, зависят от его вертикальных размеров. Согласно выполненным оценкам [Turutanov, 2014], гранитное тело мощностью 10 км (цифра соответствует толщине Богдоулинского массива) с недостатком плотности  $0.10$  г/см<sup>3</sup> при всплывании должно создавать на своей верхней границе напряжение от 60 до 100 кг/см<sup>2</sup>. Нижний же предел прочности метаморфизованных песчаников и сланцев, составляющих в основном вмещающие граниты толщи, находится на уровне 110 кг/см<sup>2</sup> [Birch et al., 1949; Turutanov, Zorin, 1978]. Т.е. даже нижний предел прочности вмещающих пород выше напряжения, которое могло бы возникнуть при движении магматического тела указанных размеров вверх под действием силы тяжести, что говорит о маловероятности такого механизма для их всплывания.

Таким образом, «прочностной» подход также демонстрирует неспособность избыточного гидростатического давления (выталкивающей силы Архимеда) обеспечить подъем гранитов Горихинского массивов до гипабиссального уровня и крайнюю маловероятность этого механизма для Богдоулинского.

В целом механизм всплывания скопления гранитной магмы, в принципе, возможен для физико-геологических условий верхней части земной коры, но он может реализоваться со скоростью, достаточной для проникновения магмы до небольших глубин, только в зонах крупных разломов, где эффективная вязкость коры и ее прочность сильно понижены вследствие тре-

щиноватости, и только для массивов, размеры которых превышают размеры изученных нами гранитных плутонов. Если сферический магматический очаг с  $R \leq 5$  км образуется на участках земной коры, где нет ослабленных зон, то магма просто не сможет всплыть до гипабиссальных уровней.

**Движение затвердевших гранитных массивов вверх с образованием положительных форм рельефа над ними.** Рассмотрим теперь процесс изостатического всплывания уже затвердевшего магматического тела пониженной плотности (граниты) с образованием положительной формы топографического рельефа над ним. Некоторые исследователи [Lishnevsky et al., 1976] считают архимедовы силы неспособными в принципе поднять горный массив на высоту 500–800 м, наиболее характерную (как они полагают) для малых форм гранитного рельефа.

Эти превышения оцениваются ими, как правило, по максимально высоким отдельным вершинам, высоты которых не типичны для всей площади геологических выходов гранитных массивов на земную поверхность, поскольку обычно рельеф здесь сильно расчленен эрозией. Такой подход, по нашему мнению, нуждается в уточнении.

Авторы полагают, что если поднятие гранитного массива после кристаллизации рассматривать как движение единого тела, то превышение его кровли над окружающей территорией нужно подсчитывать как среднюю величину, учитывая существование как относительно повышенных, так и относительно пониженных ее участков [Turutanov, 2014]. Подсчет такого среднего удобно выполнять, используя равномерную геометрическую сеть снятия высот. При таком подходе среднее превышение кровли гранитного массива над окружающими территориями оказывается значительно меньшим, чем превышение максимальной высоты отдельно стоящей горной вершины, т.е. величина среднего превышения кровли гранитного массива над окружающими территориями позволяет предполагать большую возможность его подъема до современных гипсометрических высот в результате изостатического всплывания в уже затвердевшем состоянии (рис. 7).

Авторами были определены и сопоставлены со средними высотами окружающих территорий такой же площади средние высоты по площадям выходов Богдоулинского (51 значение) и Горихинского (29 значений) гранитных массивов. Сопредельные территории выбирались вне пределов проекций подземных частей массивов на дневную поверхность (определенных гравиметрическим методом), чтобы топографические высоты этих участков не были вовлечены в зоны поднятий массивов и искажены механическим влиянием процесса становления последних (рис. 7).

Площадь геологических выходов Богдоулинского массива составляет около 250 км<sup>2</sup>. Такая же по размерам площадь рассмотрена поблизости от него (но за пределами контура его проекции на земную поверхность).

Средняя топографическая высота выходов массива равна 1753 м. Для сопредельной площади (не вовлеченной в зону становления интрузии) эта величина составляет 1212 м, т.е. превышение этого массива над сопредельной территорией, не вовлеченной в зону его становления, составляет 541 м (рис. 7).

Оценим теперь предельно возможную высоту изостатического поднятия уже затвердевшего гранитного массива над вмещающими толщами. Ее можно определить с помощью следующего изостатического соотношения:

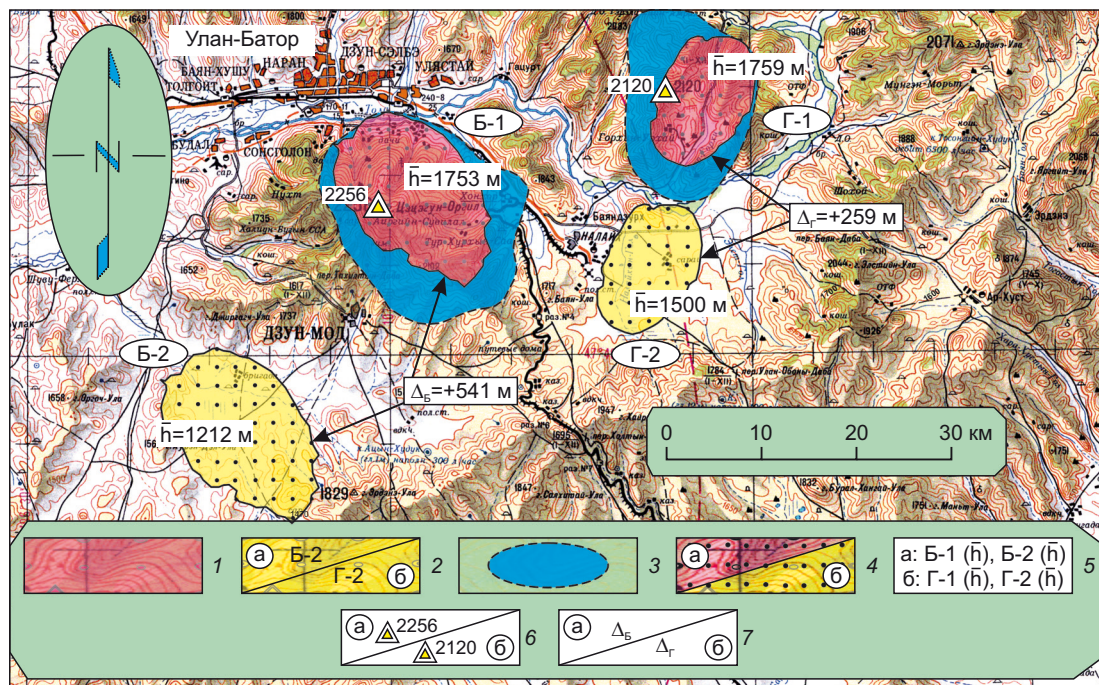
$$h_{max} = \frac{\Delta\rho}{\rho} H, \tag{3}$$

где  $h_{max}$  – искомая высота;  $H$  – мощность интрузива;  $\rho$  – плотность вмещающих пород;  $\Delta\rho$  – разница в плот-

ности интрузии и вмещающих толщ (имеется в виду современное значение разности, когда массив уже кристаллизовался).

Для Богдоулинского массива  $H=9 \cdot 10^5$  см,  $\rho=2.67$  г/см<sup>3</sup>,  $\Delta\rho=-0.1$  г/см<sup>3</sup>. Отсюда величина его максимально возможного поднятия над окружающей местностью под действием архимедовой силы, найденная по формуле (3), составляет  $h_{max}=337$  м, что на 200 м меньше, чем среднее топографическое превышение массива (541 м) над окружающей территорией (рис. 7).

Следовательно, Богдоулинский массив не способен подняться до современных топографических отметок высоты рельефа под действием архимедовой силы. Подобные оценки еще более очевидны при использовании в расчетах максимальной топографической высоты его геологических выходов.



**Рис. 7.** Площади геологических выходов гранитных массивов и равные им по площади сопредельные участки. 1 – геологические выходы массивов: Б-1 – Богдоулинского, Г-1 – Горихинского; 2 – территории, не вовлеченные в зоны становления гранитных плутонов и равные по площади геологическим выходам: а – Богдоулинского (Б-2), б – Горихинского (Г-2) массива; 3 – площади проекции гранитных массивов на земную поверхность (зоны, максимально деформированные процессом становления гранитных массивов), определенные по гравиметрическим данным; 4 – равномерная геометрическая сеть снятия топографических высот на площадях гранитных массивов (а) и на равных им по площади территориях, не вовлеченных в зоны становления гранитных массивов (б); 5 – средние топографические высоты геологических выходов и равных им площадей, не вовлеченных в зоны становления гранитных массивов для Богдоулинского (а) и Горихинского (б) плутона; 6 – максимальные высоты топографического рельефа для Богдоулинского (а) и Горихинского (б) массива; 7 – средние топографические превышения гранитных массивов над высотами сопредельных территорий, не деформированных процессами становления интрузивных тел: а – для Богдоулинского, б – для Горихинского массива.

**Fig. 7.** Outcrop areas of granite massifs and adjacent areas of equal size. 1 – massif outcrops: B-1 – Bogd Uul, G-1 – Gorkhi; 2 – areas not involved in the zones of emplacement of the granite plutons and equal in size to the outcrop areas of the (a) Bogd Uul (B-2), (б) Gorkhi (G-2) massifs; 3 – gravimetry-based granite massif areas projected onto the earth’s surface (zones maximally deformed by the granite massif emplacement process); 4 – uniform geometric grid of sampling topographic elevations on the areas of the granite massifs (a) and on the equal-size areas not involved in the granite massif emplacement zones (б); 5 – mean topographic elevations of the outcrop areas and adjacent areas of equal size not involved in the granite massif emplacement zones for the Bogd Uul (a) and Gorkhi (б) plutons; 6 – maximum topographic relief heights for the Bogd Uul (a) and Gorkhi (б) massifs; 7 – mean topographic elevations of the granite massifs above the heights of the adjacent areas not deformed by the intrusive body emplacement processes for the Bogd Uul (a) and Gorkhi (б) massifs.

Аналогичные вычисления выполнены и для Горихинского массива. Его максимально возможная по изостатическому соотношению (1) величина подъема над окружающими территориями составляет  $h_{\max} = 150$  м. Среднее же превышение массива над средней топографической высотой сопредельной территории равно 259 м. Эта величина на 109 м больше изостатически возможной для него высоты, поэтому Горихинский массив, так же как и Богдоулинский, не мог подняться на современную высоту топографического рельефа под действием архимедовой силы (рис. 7).

Очевидно, что наблюдаемые превышения «гранитного» рельефа на исследуемой территории не противоречат соображениям изостазии, но всплывание затвердевших интрузивных тел с геометрическими параметрами Богдоулинского и Горихинского массивов под действием архимедовой силы не может служить главным рельефообразующим фактором. Следовательно, наиболее вероятной причиной рельефообразования над изученными массивами является «выдавливание» магматических тел по разломам за счет существования нормального (горизонтального) напряжения в земной коре. Но этот механизм может работать только в том случае, если горизонтальные напряжения превосходят вертикальные, обусловленные весом горных пород массива.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**«Выдавливание» гранитных массивов вверх горизонтальными тектоническими напряжениями.** Выясним, как установленные особенности морфологии Богдоулинского и Горихинского гранитных массивов согласуются с гипотезой выдавливания уже затвердевших магматических тел вверх тектоническими (негидростатическими) силами по разломам и ослабленным зонам с образованием «малых» форм топографического рельефа. Этот механизм подтверждают следующие факты.

1. Вытянутость интрузивов в горизонтальном направлении [Buyantogtokh et al., 2019; Turutanov et al., 2020], что неплохо согласуется с гипотезой насильственного внедрения магмы, поскольку свидетельствует о приуроченности их к зонам разломов, а вариации толщины плутонов по простиранию, по-видимому, связаны с различием в условиях их становления.

2. Совпадение поднятий кровли плутонов с утолщениями последних. Подобное воздымание кровли происходит, по-видимому, за счет насильственного внедрения магматических масс в полости и приподнимания гранитами вышележащих пород.

3. Изученные гранитные массивы в сечениях, где их вертикальная мощность максимальна, имеют клиновидную форму [Buyantogtokh et al., 2019; Turutanov et al., 2020]. Движение вверх массивов такой формы хорошо согласуется с представлениями о «выдавливании» гранитных клиньев при тангенциальных сжатиях земной коры [Thom, 1957; Trifonov et al., 1968; Svarichevskaya, Skublova, 1975].

4. Наличие новейшего тангенциального сжатия в регионе, что подтверждается данными непосредственных измерений напряжений горных пород в шахтах на глубине от 100 до 3000 м. Результаты экспериментальных исследований в полной мере подтверждают геодинамическую модель состояния верхних слоев земной коры, которая отражает факт преобладания горизонтальных напряжений над вертикальными, обусловленными весом налегающих пород [Trifonov et al., 1968; Markov, 1977; Cunha, 1990; Timofeev et al., 1999; Leont'ev, 2001; Maslov et al., 2001]. Для Сибири и восточной части Северной Евразии среднее нормальное (горизонтальное) напряжение составляет около 27.5 МПа [Cunha, 1990; Brune, Thatcher, 2002], для южного пояса Северной Евразии – около 36.6 МПа. Столь высокий уровень горизонтальных напряжений обусловлен, скорее всего, тем, что эта территория наиболее сейсмоактивна и характеризуется сложным геологическим строением с сильно расчлененным рельефом [Leont'ev, 2001]. Для Северной Евразии суммарные горизонтальные напряжения оцениваются величинами 20–30 МПа, иногда 60–70 МПа, что в десятки раз превышает составляющую горизонтального напряжения, обусловленную боковым распором от веса вышележащих пород Богдоулинского и Горихинского массивов. Эти величины горизонтальных напряжений хорошо согласуются со средними теоретическими оценками, полученными для длинноволновых дифференциальных напряжений сдвига, усредненных по всей литосфере, которые приблизительно оцениваются в диапазоне ~10–100 МПа [Brune, Thatcher, 2002]. Многолетние наблюдения напряженно-деформированного состояния территории Монголии также позволяют сделать вывод о преобладающей роли горизонтальных напряжений сжатия [Parfeevets et al., 2002].

Таким образом, теоретически и экспериментально установленное горизонтальное сжатие горных пород в Монголо-Сибирском регионе свидетельствует о наличии тангенциальных тектонических сил, величина которых, в отличие от гидростатических, может являться причиной «выдавливания» вверх затвердевших интрузивных тел клиновидной формы с образованием положительных структурных форм рельефа над ними.

Сопоставим величины вертикальных и горизонтальных составляющих напряжений в районе становления интрузивов. С целью вычисления вертикальной составляющей напряжений массивы аппроксимировались ограниченными по простиранию горизонтальными цилиндрическими телами с круговыми вертикальными сечениями, геометрические характеристики которых соответствуют реальным параметрам геолого-геофизических моделей, полученных в результате инверсии локальных (остаточных) гравитационных аномалий (см. рис. 3, 4, 5, 6).

Согласно данным геолого-геофизического моделирования, средняя величина площади вертикального сечения горизонтального цилиндра, аппроксимирующего

Богдоулинский массив, равна  $66.5 \text{ км}^2$  ( $58 \text{ км}^2$  для профиля 1 и  $75 \text{ км}^2$  для профиля 2 (см. рис. 3, 5)). Отсюда средний радиус кругового вертикального сечения горизонтального цилиндра, аппроксимирующего этот массив, равен 4.6 км. Его длина вдоль профиля 4 (см. рис. 3, 5) равна 24 км. Объем такого цилиндра равен  $1585 \text{ км}^3$ , вес при плотности гранитов  $2.570 \text{ кг/м}^3$  составляет  $4 \cdot 10^{15} \text{ Н}$ , а вертикальная составляющая давления достигает 13 МПа. Для Горихинского массива последняя величина, вычисленная аналогичным способом, составляет 7 МПа.

Принимая во внимание невозможность архимедовых сил поднять Богдоулинский и Горихинский гранитные массивы до современных гипсометрических высот, полагаем, что главная причина формирования положительных форм топографического рельефа над этими массивами связана с существующими интенсивными тангенциальными (сверхвысокими) напряжениями в земной коре, достаточными, как установлено экспериментальными и теоретическими данными для Монголо-Сибирского региона, для «выдавливания» гранитов по разломам, контролирующим эти массивы. При этом необходимым условием осуществления такого механизма образования рельефа является приуроченность гранитных массивов к зонам крупных глубинных разломов и их клиновидная форма.

## 5. ДИСКУССИЯ

Вертикальные сечения трехмерных геолого-геофизических моделей мезозойских гранитных массивов Восточной Монголии, установленные в результате инверсии гравитационных аномалий Буге, имеют ярко выраженную клиновидную форму. Эти данные послужили основанием для разработки одной из фундаментальных проблем геоморфологии – представлений о механизме движения уже затвердевших гранитных тел в верхней части земной коры и объяснения возможных причин возникновения локальных положительных форм рельефа над ними.

Расчетами авторов установлено, что движение магматических очагов с размерами, соответствующими модельным Богдоулинскому и Горихинскому гранитным массивам, с уровня вероятного образования магм до гипабиссальных глубин под действием архимедовых сил маловероятно, а движение их вверх в уже затвердевшем состоянии до современных высотных отметок с образованием малых форм рельефа вообще невозможно. Во-первых, объем их слишком мал, чтобы преодолеть сопротивление вмещающих толщ при движении сферического магматического тела сквозь земную кору. Во-вторых, современные осредненные высоты геологических выходов Богдоулинского и Горихинского массивов значительно больше их максимальных значений, определенных с помощью изостатического соотношения.

Следовательно, наблюдаемые средние высотные отметки рельефа кровли изученных гранитных массивов не могут быть достигнуты за счет сил конвек-

тивной неустойчивости (архимедовых сил) и не могут быть причиной образования современного положительного топографического рельефа над ними.

Для проверки работоспособности механизма движения уже затвердевших гранитных массивов вверх («выдавливание» гранитов по разломам) под действием тангенциальных сил было проведено сравнение величин вертикальной и горизонтальной составляющих тектонических напряжений в районах становления массивов. Оказалось, что вертикальные напряжения, обусловленные весом горных пород гранитных массивов с геометрическими параметрами, установленными в результате инверсии гравитационных аномалий Буге, меньше средней величины существующего нормального (горизонтального) тектонического напряжения, экспериментально установленного для района исследований, и не могут его блокировать.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе определенных по гравиметрическим данным форм и размеров исследуемых гранитных массивов, с учетом возможности их изостатического подъема в уже затвердевшем состоянии до современного гипсометрического уровня и величины горизонтальных напряжений в земной коре региона сделан вывод о том, что движение гранитов вверх с образованием положительных форм рельефа могло происходить в результате «выдавливания» этих тел по разломам горизонтальными тектоническими напряжениями, существование и высокая интенсивность которых теоретически и экспериментально установлены в Монголо-Сибирском регионе. Важнейшими условиями работоспособности подобного механизма являются клиновидная форма массивов, наличие разломов высокого ранга, контролирующих их форму и обеспечивающих существенное понижение вязкости вмещающих толщ в районе становления интрузивов, а также обстановка сверхвысокого горизонтального сжатия на окружающей территории. Приведенные результаты выполнены авторами исследований могут быть использованы в геолого-геоморфологических работах при решении фундаментальной проблемы создания генетической классификации топографического рельефа в районах проявления гранитоидного магматизма, к которым относятся исследуемые плутоны мезозойского гранитоидного магматизма Центральной и Восточной Монголии.

## 7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность рецензентам за конструктивные замечания, позволившие улучшить качество статьи.

## 8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final version.

### 9. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

### 10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Ananyev G.S., Karevskaya I.A., 1970. The Role of Weathering and Selective Denudation in Formation of Isolated Granite Massifs. Iss. 191. The West Siberian Branch of the Geological Society of the USSR, Chita, p. 15–22 (in Russian) [Ананьев Г.С., Каревская И.А. Роль выветривания и селективной денудации в формировании обособленных гранитных массивов. Чита: Западно-Сибирское отделение географического общества СССР, 1970. Вып. 151. С. 15–22].

Antipin V.S., 1992. Geochemical Evolution of Calc-Alkalic and Subalkalic Magmatism. Nauka, Novosibirsk, 210 p. (in Russian) [Антипин В.С. Геохимическая эволюция известково-щелочного и субщелочного магматизма. Новосибирск: Наука, 1992. 210 с.]

Antipin V.S., Filippova I.B., Gerel O., Lyzin A.V., 1976a. Inner Zoning of Hypabyssal Intrusions (Gorikh Granite Massif, MPR). Russian Geology and Geophysics 17 (3), 45–56 (in Russian) [Антипин В.С., Филиппова И.Б., Гэрэл О., Лызин А.В. Внутренняя зональность гипабиссальных интрузий (Горихинский гранитный массив, МНР) // Геология и геофизика. 1976. № 3. С. 45–56.]

Antipin V.S., Filippova I.B., Gerel O., Lyzin A.V., 1976b. Structural-Geological Position and Origin of the Inner Zones of Hypabyssal Intrusions (by the Example of the Gorikh Granite Massive in the MPR). Russian Geology and Geophysics 17 (3), 44–45 (in Russian) [Антипин В.С., Филиппова И.Б., Гэрэл О., Лызин А.В. Структурно-геологическое положение и происхождение внутренней зональности гипабиссальных интрузий (на примере Горихинского гранитного массива в МНР) // Геология и геофизика. 1976. Т. 17. № 3. С. 44–45].

Bankwitz P., 1975. Magmentektonische Aspekte der Intrusion des Erzgebirge Plutons. Geologische und Geophysische Veröffentlichungen 3 (36), 48.

Belousov V.V., 1966. On the Possible Subsurface Conditions of Magmatism. Soviet Geology 4, 8–25 (in Russian) [Белоусов В.В. О возможных глубинных условиях магматизма // Советская геология. 1966. № 4. С. 8–25].

Birch Fr., Schairer J., Spicer H., 1949. Handbook of Physical Constants. Inostrannaya Literatura, Moscow, 304 p. (in Russian) [Берч Фр., Шерер Дж., Спейсер Г. Справочник для геологов по физическим константам. М.: Иностранная литература, 1949. 304 с.]

Borozdin B.G., Semakin V.P., 1969. On the Differential Uplift of Granite Massifs in Kazakhstan and Altai. In: The Earth's Crust in the Folded Areas of the Southern Siberia. Nauka, Novosibirsk, p. 251–261 (in Russian) [Бороздин Б.Г., Семакин В.П. Об избирательном поднятии гранитных

массивов Казахстана и Алтая // Земная кора складчатых областей юга Сибири. Новосибирск: Наука, 1969. С. 251–261].

Brune J.N., Thatcher W., 2002. Strength and Energetics of Active Fault Zones. International Geophysics 81 (A), 569–588. [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(02\)80238-8](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(02)80238-8).

Buyantogtoh B., Turutanov E.Kh., Arvisbaatar N., Tuvshinjargal B., 2015. The Structure of the Bogd Uul Granite Massive (Mongolia) Based on the Gravimetric Data. In: Recent Geodynamics and Natural Hazards in Central Asia. Proceedings of the X Russian-Mongolian Conference on the Problems of Astronomy and Geophysics "Solar-Terrestrial Physics and Seismogeodynamics of the Baikal-Mongolian Region" (Ulaanbaatar, Mongolia, September 29 – October 3, 2014). Iss. 8. IEC SB RAS, Irkutsk, p. 91–99 (in Russian) [Буянтогтох Б., Турутанов Е.Х., Арвисбаатар Н., Тувшинжаргал Б. Строение Богдоулинского гранитного массива (Монголия) по гравиметрическим данным // Современная геодинамика и опасные процессы в Центральной Азии: Труды X Российско-Монгольской конференции по проблемам астрономии и геофизики «Солнечно-земная физика и сейсмогеодинамика Байкало-Монгольского региона» (г. Улан-Батор, Монголия, 29 сентября – 3 октября 2014 г.). Вып. 8. Иркутск: ИЭК СО РАН, ИСЗФ СО РАН, 2015. С. 91–99].

Buyantogtoh B., Turutanov E.Kh., Kanaikin V.S., 2019. Crustal Structure of the Ulaanbaatar Region, Mongolia According to Gravimetric Data. Geodynamics & Tectonophysics 10 (3), 585–602 (in Russian) [Буянтогтох Б., Турутанов Е.Х., Канайкин В.С. Структура земной коры Улан-Баторского района Монголии по гравиметрическим данным // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 3. С. 585–602]. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0428>.

Cunha A.P. (Ed.), 1990. Scale Effect in Rock Mechanics. Proceedings of the First International Workshop on Scale Effects in Rock Masses (Loen, Norway, June 7–8, 1990). Rotterdam, Balkema, 339 p.

Dzhurik V.I., Klyuchevskii A.V., Serebrennikov S.P., Demyanovich V.M., Batsaikhan Ts., Bayaraa G., 2009. Seismicity and Seismic Hazard Zoning in Mongolia. IEC SB RAS, Irkutsk, 409 p. (in Russian) [Джурик В.И., Ключевский А.В., Серебренников С.П., Демьянович В.М., Батсайхан Ц., Баяраа Г. Сейсмичность и районирование сейсмической опасности территории Монголии. Иркутск: ИЭК СО РАН, 2009. 420 с.]

Fedorovich B.A., 1975. On the Four Poorly Studied Problems of Mountain Morphostructures. In: Structural Geomorphology of Mountains. Nauka, Moscow, p. 25–29 (in Russian) [Федорович Б.А. О четырех малоизученных проблемах морфоструктуры горных стран // Структурная геоморфология горных стран. М.: Наука, 1975. С. 25–29].

Fyfe W., 1972. Some Thoughts on Granitic Magmas. In: G. Newall, N. Rast (Eds). Mechanism of Igneous Intrusion. Mir, Moscow, p. 160–173 (in Russian) [Файф У. Несколько мыслей о гранитных магмах // Механизм интрузий магмы / Ред. Дж. Ньюолл, Н. Раст. М.: Мир, 1972. С. 173–186].

Gerel O., 1978. Petrology and Geochemistry of Granitoids with Crystal-Bearing Pegmatites (Eastern Mongolia).

PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Irkutsk, 242 p. (in Russian) [Гэрэл О. Петрология и геохимия гранитоидов с хрусталеносными пегматитами (Восточная Монголия): Дис. ... к. г.-м.н. Иркутск, 1978. 242 с.].

Harris P., Kennedy W., Scarfe K., 1972. Volcanism Versus Plutonism – the Effect of Chemical Composition. In: G. Newall, N. Rast (Eds). Mechanism of Igneous Intrusion. Mir, Moscow, p. 160–173 (in Russian) [Харрис П., Кеннеди У., Скарф К. Соотношения вулканизма и плутонизма в свете вариаций химического состава горных пород // Механизм интрузий магмы / Ред. Дж. Ньюолл, Н. Раст. М.: Мир, 1972. С. 160–173].

Kharchenko S.V., 2020. New Challenges of Geomorphometry and Automatic Morphological Classifications in Geomorphology. *Geomorphology* 1, 3–21 (in Russian) [Харченко С.В. Новые задачи морфометрии рельефа и автоматизированные морфологические классификации в геоморфологии // *Геоморфология*. 2020. № 1. С. 3–21]. <https://doi.org/10.31857/S043542812001006X>.

Khasin R.A. et al. (Eds), 1973. Geology of the Mongolian People's Republic. Vol. 2. Magmatism, Metamorphism, Tectonics. Nedra, Moscow, 751 p. (in Russian) [Геология Монгольской Народной Республики. Т. 2: Магматизм, метаморфизм, тектоника / Ред. Р.А. Хасин и др. М.: Недра, 1973. 751 с.].

Khishigsuren S., Gerel O., Dill H.G., Oyungerel S., Munkhbat B., 2006a. Geochemistry of the Bogd Uul Granite, Central Mongolia. *Mongolian Geoscientist* 29, 43–46.

Khishigsuren S., Gerel O., Munkhbat B., 2006b. Geochemistry of the Bogd Uul and Janchivlan Plutons, Khentey Range, Central Mongolia. In: Structural and Tectonic Correlation Across the Central Asia Orogenic Collage. Implications for Continental Growth and Intracontinental Deformations. Abstracts of the Second International Workshop and Field Excursions for IGCP Project-480 (July 25 – August 5, 2005). Ulaanbaatar, Mongolia, p. 76–78.

Khudyakov G.I., 1964. On the Morphostructural Characteristic of the Mesozoic-Cenozoic Intrusions in Some Areas of the Southern Far East. In: Neotectonic Problems. Abstracts (May 19–23, 1964). Moscow, p. 117–118 (in Russian) [Худяков Г.И. О морфоструктурной характеристике мезозойско-кайнозойских интрузивов в отдельных районах юга Дальнего Востока // Проблемы неотектоники: Тезисы докладов (19–23 мая 1964 г.). М., 1964. С. 117–118].

Khudyakov G.I., 1965. On the Origin of the Mountain Ranges in the Southern Far East. In: The Problems in Geomorphology and Morphotectonics of the Southern Far East. Far Eastern Publishing House, Vladivostok, p. 144–150 (in Russian) [Худяков Г.И. О происхождении горных хребтов в южной части Дальнего Востока // Вопросы геоморфологии и морфотектоники южной части Дальнего Востока. Владивосток: Дальневосточное книжное издательство, 1965. С. 144–150].

Korzinsky D.S., 1955. The Problems of Petrography of Magnetic Rocks Associated with Transmagmatic Solutions and Granitization. In: Magmatism and Associated Mineral Deposits. Transactions of the 1st All-Union Petrographic

Meeting. Publishing House of the USSR Academy of Sciences, Moscow, p. 220–234 (in Russian) [Коржинский Д.С. Проблемы петрографии магматических пород, связанные со сквозьмагматическими растворами и гранитизацией // Магматизм и связь с ним полезных ископаемых: Труды 1-го Всесоюзного петрографического совещания. М.: Изд-во АН СССР, 1955. С. 220–234].

Koval P.V., Yakimov V.M., Neigebauer V.A., Goreglyad A.V., 1982. Regional Petrochemistry of the Mesozoic Intrusions in Mongolia. Vol. 34. Nauka, Moscow, 207 p. (in Russian) [Коваль П.В., Якимов В.М., Нейгебауэр В.А., Горегляд А.В. Региональная петрохимия мезозойских интрузий Монголии. М.: Наука, 1982. Т. 34. 207 с.].

Kovalenko V.I., Kuzmin M.I., Antipin V.S., 1984. Mesozoic Magmatism of the Mongol-Okhotsk Belt and Its Possible Geodynamic Interpretation. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Geological Series* 7, 93–107 (in Russian) [Коваленко В.И., Кузьмин М.И., Антипин В.С. Мезозойский магматизм Монголо-Охотского пояса и его возможная геодинамическая интерпретация // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1984. № 7. С. 93–107].

Kozlov V.D., 1985. Geochemistry and Mineralization of Rare-Metal Granitoids. Nauka, Moscow, 304 p. (in Russian) [Козлов В.Д. Геохимия и рудоносность гранитоидов редкометалльных провинций. М.: Наука, 1985. 304 с.].

Kuzmin M.I., 1985. Geochemistry of Magmatic Rocks of Phanerozoic Mobile Belts. Nauka, Novosibirsk, 199 p. (in Russian) [Кузьмин М.И. Геохимия магматических пород фанерозойских подвижных поясов. Новосибирск: Наука, 1985. 199 с.].

Kuznetsov N.T., 1972. On the Knowledge of Denudation by the Example of Mountains in Central Mongolia. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Geography Series* 1, 25–35 (in Russian) [Кузнецов Н.Т. К познанию денудации на примере гор Центральной Монголии // Известия АН СССР. Серия географическая. 1972. № 1. С. 25–35].

Laperdin V.K., Trzhtsin'sky Yu.B., 1977. Exogenous Geological Processes and Mudflows in the Eastern Sayan Mountains. Novosibirsk, Nauka, 101 p. (in Russian) [Лапёрдин В.К., Тржцинский Ю.Б. Экзогенные геологические процессы и сели Восточного Саяна. Новосибирск: Наука, 1977. 101 с.].

Lebedeva N.B., 1956. Modeling of the Diapiric Domal Formation Process. *Soviet Geology* 54, 163–175 (in Russian) [Лебедева Н.Б. Моделирование процесса образования диапировых куполов // Советская геология. 1956. № 54. С. 163–175].

Leont'ev A.V., 2001. Analysis of Natural Stresses According to the Measurement Results in Mines on the Territory of Northern Eurasia. *Journal of Mining Science* 37 (1), 28–37. <https://doi.org/10.1023/A:1016776600934>.

Leontyev A.N., Didenko M.I., 1973. On the Relationship of Metal-Bearing Potassium Granites and Pegmatite Fields with the Central Kalba Block Structure Elements. In: Metallogenic and Geological Studies. Iss. 4. Moscow, p. 41–50 (in Russian) [Леонтьев А.Н., Диденко М.И. О соотношении металллоносных калиевых гранитов и пегматитовых полей с элементами блоковой структуры Центральной

Калбы // *Металлогенические и геологические исследования*. М., 1973. Вып. 4. С. 41–50].

Letnikov F.A., Balyshev S.O., Lashkevich V.V., 2000. Interrelations Among the Processes of Granitization, Metamorphism, and Tectonics. *Geotectonics* 34 (1), 1–18.

Lishnevsky E.N., 1965. On an Active Role of Granite Intrusions in Orogenic Processes. *Geotectonics* 3, 77–85 (in Russian) [Лишневский Э.Н. Об активной роли гранитных интрузий в процессе горообразования // *Геотектоника*. 1965. № 3. С. 77–85].

Lishnevsky E.N., Shevchenko V.K., Bronguleev V.V., 1976. Geological Indications and Mechanism of Post-Magmatic Rise of Granites (by the Example of the Lower Amur River Region and Western Priolkhonye). *Geotectonics* 5, 93–101 (in Russian) [Лишневский Э.Н., Шевченко В.К., Бронгулеев В.В. Геологические признаки и проблемы постмагматического поднятия гранитов (на примере Нижнего Приамурья и Западного Приольхонья) // *Геотектоника*. 1976. № 5. С. 93–101].

Lisitsyn S.A., Tsyganov E.M., 1963. Crystal-Bearing Pegmatites near the Ulaanbaatar Area in Eastern Mongolia. In: *Materials on Geology of the Mongolian Peoples' Republic*. Moscow, p. 171–190 (in Russian) [Лисицын С.А., Цыганов Е.М. Хрусталеносные пегматиты Приуланбааторского района Восточной Монголии // *Материалы по геологии Монгольской Народной Республики*. М., 1963. С. 171–190.]

Magnitsky V.A., 1964. Zonal Melting as Mechanism in Evolution of the Earth's Crust. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Geological Series* 11, 1496–1499 (in Russian) [Магницкий В.А. Зонная плавка как механизм образования земной коры // *Известия АН СССР. Серия геологическая*. 1964. № 11. С. 3–8].

Marchand D.E., 1971. Rates and Modes of Denudation, White Mountains, Eastern California. *American Journal of Science* 270 (2), 109–135. <https://doi.org/10.2475/ajs.270.2.109>.

Markov G.A., 1977. Tectonic Stresses and Mountain Pressure in Mines of the Khibiny Massif. *Nauka, Leningrad*, 213 p. (in Russian) [Марков Г.А. Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. Л.: Наука, 1977. 213 с.].

Maslov L.A., Kuznetsov V.E., Komova O.S., 2001. Stress Field Due to Crustal Density Inhomogeneities in the Area of Profile Obluchie – Datta Cape (Priamurye), Relation to Deep Structure and Geophysical Fields. *Russian Journal of Pacific Geology* 20 (5), 25–30 (in Russian) [Маслов Л.А., Кузнецов В.Е., Комова О.С. Поле напряжений литосферы в районе профиля Облучье – мыс Датта (Приамурье) // *Тихоокеанская геология*. 2001. Т. 20. № 5. С. 25–30].

Minina E.A., Borisov V.A., 1975. Circular and Domal Morphostructures (by the Example of the Altai-Sayan Mountains). In: *Structural Geomorphology of Mountains*. Nauka, Moscow, p. 47–51 (in Russian) [Минина Е.А., Борисов В.А. Кольцевые и купольные морфоструктуры (на примере Алтае-Саянской горной страны) // *Структурная геоморфология горных стран*. М.: Наука, 1975. С. 47–51].

Osipov M.A., 1976. The Features of the Formation of Granitoid Intrusions and Endogenous Mineralization in Dif-

ferent Tectonic Settings. In: *Materials to the Fifth All-Union Petrographic Meeting*. Vol. 1. Nauka, Alma-Ata, p. 26–23 (in Russian) [Осипов М.А. Особенности формирования интрузивов гранитоидов и эндогенной минерализации в разной тектонической обстановке // *Материалы к пятому Всесоюзному петрографическому совещанию*. Алма-Ата: Наука, 1976. Т. 1. С. 26–23].

Ovander M.G., 1975. The Analysis of Local Morphostructures of the Upper Sayan Mountains. In: *Structural Geomorphology of Mountains*. Nauka, Moscow, p. 212–213 (in Russian) [Овандер М.Г. Анализ локальных морфоструктур Верхоянских гор // *Структурная геоморфология горных стран*. М.: Наука, 1975. С. 212–213].

Parfeevets A.V., Sankov V.A., Miroshnichenko A.I., Lukhnev A.V., 2002. Evolution of the Crustal Stress State of the Mongolia-Baikal Mobile Belt. *Russian Journal of Pacific Geology* 21 (1), 14–28 (in Russian) [Парфеевец А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Лухнев А.В. Эволюция напряженного состояния земной коры Монголо-Байкальского подвижного пояса // *Тихоокеанская геология*. 2002. Т. 21. № 1. С. 14–28].

Patalakha E.I., 1970. The Effect of Differential Mechanical Mobility of Heterogeneous Media in Tectonic Processes (Viscous Inversion) and Its Significance for Deep Geology. *Bulletin of the Academy of Sciences of KazSSR. Geological Series* 5, 47–51 (in Russian) [Паталаха Е.И. Эффект дифференциальной механической подвижности гетерогенных сред в тектонических процессах (вязкостная инверсия) и его значение для глубинной геологии // *Известия АН КазССР. Серия геологическая*. 1970. № 5. С. 47–51].

Pek A.A., 1968. On the Phenomenon of Magmatic Dike Intrusion. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Geological Series* 7, 3–14 (in Russian) [Пэк А.А. Об интрузивной способности магматических расплавов при дайкообразовании // *Известия АН СССР. Серия геологическая*. 1968. № 7. С. 3–14].

Pitcher W.S., 1975. On the Rate of Emplacement of Batholiths. *Journal of the Geological Society* 131 (6), 587–591. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.131.6.0587>.

Rare-Metal Granitoids of Mongolia, 1971. *Nauka, Moscow*, 233 p. (in Russian) [Редкометалльные гранитоиды Монголии. М.: Наука, 1971. 233 с.].

Shipulin V.K., 1968. Intrusions and Mineralization. *Nauka, Moscow*, p. 139–153 (in Russian) [Шипулин В.К. Интрузии и рудообразование. М.: Наука, 1968. С. 139–153].

Skublova N.V., Zailin B.S., 1969. On Circular Morphostructures of the Northern Pribaikalye. *Bulletin of Leningrad State University. Geologic and Geophysics Series* 2 (12), 139–150 (in Russian) [Скублова Н.В., Зайлин Б.С. О кольцевых морфоструктурах Северного Прибайкалья // *Вестник ЛГУ. Серия геологическая и геофизическая*. 1969. Вып. 2. № 12. С. 139–150].

Solovyov V.V., 1975. The Central-Type Morphostructures in Mountains and Their Classification. In: *Structural Geomorphology of the Mountains*. Nauka, Moscow, p. 42–46 (in Russian) [Соловьёв В.В. Морфоструктуры центрального типа в горных странах и их классификация //

Структурная геоморфология горных стран. М.: Наука, 1975. С. 42–46].

Svarichevskaya Z.A., 1975. Mountains, Their Formation and Classification. In: Structural Geomorphology of the Mountains. Nauka, Moscow, p. 20–25 (in Russian) [Сваричевская З.А. Горы, их образование и классификация // Структурная геоморфология горных стран. М.: Наука, 1975. С. 20–25].

Svarichevskaya Z.A., Skublova N.V., 1975. On the Nature of Island Mountains in Central Kazakhstan. In: Structural Geomorphology of Mountains. Nauka, Moscow, p. 131–135 (in Russian) [Сваричевская З.А., Скублова Н.В. О природе островных гор Центрального Казахстана // Структурная геоморфология горных стран. М.: Наука, 1975. С. 131–135].

Tauson L.V., 1977. Geochemical Types and Mineralization Potential of Granitoids. Nauka, Moscow, 280 p. (in Russian) [Таусон Л.В. Геохимические типы и потенциальная рудоносность гранитоидов. М.: Наука, 1977. 280 с.].

Thom W.T., 1957. Wedge Uplifts and Their Tectonic Significance. In: Crust of the Earth. Inostrannaya Literatura, Moscow, p. 379–386 (in Russian) [Том В.Т. Поднятие клиньев и их тектоническое значение // Земная кора. М.: Иностранная литература, 1957. С. 379–386].

Tikhomirov V.G., 1975. Paleozoic Magmatism and Tectonics of Central Kazakhstan. Nedra, Moscow, 148 p. (in Russian) [Тихомиров В.Г. Палеозойский магматизм и тектоника Центрального Казахстана. М.: Недра, 1975. 148 с.].

Timofeev V.Yu., Semibalamut V.M., Arnautov G.P., Kalish E.N., Stus' Yu.F., Ducarme B., Anisimova L.V., Rybushkin A.Yu., Fomin Yu.N., Zalutskii V.T., 1999. Experimental Models for the Earth's Crust Deformations in the Southwest of the Baikal Rift Zone. Russian Geology and Geophysics 40 (3), 387–394 (in Russian) [Тимофеев В.Ю., Семибаламут В.М., Арнаутов Г.П., Калиш Е.Н., Стусь Ю.Ф., Дюкарм Б., Анисимова Л.В., Рыбушкин А.Ю., Фомин Ю.Н., Залуцкий В.Т. Модели деформирования земной коры юго-западной части Байкальской рифтовой зоны по экспериментальным данным // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 3. С. 387–394].

Trifonov V.P., Vlokh I.P., Aleinikov A.L., Belavin O.V., Zubkov A.V., 1968. The Phenomenon of Granite-Massif Pressing Out in the Urals. Doklady of the USSR Academy of Sciences 179 (1), 169–170 (in Russian) [Трифонов В.П., Влох И.П., Алейников А.Л., Белавин О.В., Зубков А.В. Явление выдавливания гранитных массивов на Урале // Доклады АН СССР. 1968. Т. 179. № 1. С. 169–170].

Turner F.J., Verhogen J., 1961. Igneous and Metamorphic Petrology. Inostrannaya Literatura, Moscow, 592 p. (in Russian) [Тернер Ф., Ферхуген Дж. Петрология изверженных и метаморфических пород. М.: Иностранная литература, 1961. 592 с.].

Turutanov E.Kh., 2014. Formation of Granite Intrusions and Relief Formation. Lithosphere 1, 117–122 (in Russian) [Турутанов Е.Х. Становление гранитных интрузий и рельефообразование // Литосфера. 2014. № 1. С. 117–122].

Turutanov E.Kh., Buyantogtokh B., Tengis B., 2020. The Shape and Size Gorikhinsky Granite Massif (Mongolia). The

Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences 31, 85–101 (in Russian) [Турутанов Е.Х., Буянтотгох Б., Тэнгис Б. Форма и размеры Горихинского гранитного массива (Монголия) // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2020. Т. 31. С. 85–101]. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.31.85>.

Turutanov E.Kh., Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., 2022. Present-Day Structure of the Earth's Crust and Paleogeodynamics of the Mongolian-Siberian Region. SB RAS Publishing House, Novosibirsk, 118 p. (in Russian) [Турутанов Е.Х., Мазукабзов А.М., Складаров Е.В. Современная структура земной коры и палеогеодинамика Монголо-Сибирского региона. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2022. 118 с.].

Turutanov E.Kh., Zorin Yu.A., 1978. Deep Structure of Granite Plutons in Mongolia and Transbaikalia. In: F.A. Letnikov (Ed.). Nauka, Novosibirsk, 60 p. (in Russian) [Турутанов Е.Х., Зорин Ю.А. Глубинное строение гранитных плутонов Монголии и Забайкалья / Ред. Ф.А. Летников. Новосибирск: Наука, 1978. 60 с.].

Ushakov S.A., Krass M.S., 1972. Gravity and the Earth's Interior Mechanics Problems. Nedra, Moscow, 155 p. (in Russian) [Ушаков С.А., Красс М.С. Сила тяжести и вопросы механики недр Земли. М.: Недра, 1972. 155 с.].

Vinogradov A.P., 1959. Meteorites and the Earth's Crust (Geochemistry of Isotopes). In: Chemistry of Radioelements and Radiation Transformations. Vol. IV. Atomizdat, Moscow, p. 5–27 (in Russian) [Виноградов А.П. Метеориты и земная кора (геохимия изотопов) // Химия радиоэлементов и радиационных превращений. М.: Атомиздат, 1959. Т. IV. С. 5–27].

Vladykin N.V., Kovalenko V.I., Dorfman M.D., 1981. Mineralogical and Geochemical Features of the Khan Bogd Alkaline Granite Massif (MPR). Nauka, Moscow, 135 p. (in Russian) [Владыкин Н.В., Коваленко В.И., Дорфман М.Д. Минералогические и геохимические особенности Хан-Богдинского массива щелочных гранитов (МНР). М.: Наука, 1981. 135 с.].

Webring M., 1985. Semi-Automatic Marquardt Inversion of Gravity and Magnetic Profiles. USGS Open-File Report 85-122. 48 p.

Willis B., 1941. Asthenolith (Melting Spot) Theory. Central Geological Library, Leningrad, 21 p. (in Russian) [Уиллис Б. Теория астенолитов (местного плавления). Л.: Центральная геологическая библиотека, 1941. 21 с.].

Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Sal'nikova E.B., Budnikov S.V., Kovach V.P., Kotov A.B., Ponomarchuk V.A., 2002. Tectono-Magmatic Zoning, Sources of Igneous Rocks and Geodynamics of the Early Mesozoic Mongolo-Transbaikalian Region. Geotectonics 36 (4), 293–311.

Zorina V.S., Skublova N.V., 1975. The Importance of Lithological and Tectonic Factors in Formation of Island Mountains in the Northern Pribaikalye. In: Structural Geomorphology of Mountains. Nauka, Moscow, p. 136–138 (in Russian) [Зорина В.С., Скублова Н.В. Значение литологического и тектонического факторов при образовании островных гор Северного Прибайкалья // Структурная геоморфология горных стран. М.: Наука, 1975. С. 136–138].