



<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-4-89-100>
УДК 551.4.08: 553.411.071



ГЕОМОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА ЗИМБАБВЕ И ВОПРОСЫ ЭКЗОГЕННОЙ МЕТАЛЛОГЕНИИ

П.А. ИГНАТОВ^{1,*}, Е.В. ПОЛЯКОВА², А.Л. МИНЕЕВ², С.А. МАЛЮТИН¹

¹ ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия

² Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова
Уральского отделения Российской академии наук
20, проспект Никольский, г. Архангельск 163020, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Основу минерально-сырьевой базы Республики Зимбабве составляют многочисленные эндогенные месторождения хрома, никеля, меди, платины, золота, алмазов и других полезных ископаемых. Экзогенные месторождения имеют меньшее значение. Большинство экзогенных месторождений никеля в коре выветривания и золоторудных россыпей уже отработано. Однако перспективы выявления новых объектов далеко не исчерпаны. Актуален вопрос прогнозирования и поисков скрытых экзогенных месторождений.

Цель. Проведение геоморфометрического анализа цифровой модели рельефа Зимбабве с целью прогнозирования и поисков скрытых экзогенных месторождений полезных ископаемых.

Материалы и методы исследования. Для построения цифровой модели рельефа (ЦМР) территории Республики Зимбабве были использованы 120 сцен глобальной ЦМР SRTM Void Filled (версия SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) с заполненными областями отсутствующих данных) с пространственным разрешением 3 угловые секунды (~90 метров в пикселе). Данные были получены посредством сервиса EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov>) от USGS (Служба геологической съемки США). Все операции осуществлялись в свободно распространяемом программном обеспечении SAGA GIS (<http://www.saga-gis.org>).

Результаты. В основе оценки перспектив выявления экзогенных месторождений, сформировавшихся в неоген-четвертичное время, может лежать расчет геоморфометрических параметров рельефа. Авторами проведен такой анализ цифровой модели рельефа Зимбабве. Установлено, что в рельефе отчетливо выражены региональные элементы геологического строения: выходы архейского фундамента, Великая дайка, протерозойские образования складчатого обрамления фундамента, породы мезозойского и кайнозойского чехла. В крупных сегментах рельефа отражены металлогенические таксоны, включая Зимбабвийский архейский эндогенный рудный пояс. Главный водораздел делит территорию на две геоморфологически разные части: северо-западную и юго-восточную.

Заключение. Показано, что в крупных сегментах рельефа отражены и металлогенические таксоны, включая Зимбабвийский архейский рудный пояс. Предполагается, что северо-западнее главного водораздела должны быть широко распространены погребенные россыпи золота и платины, а также переотложенные месторождения кобальта, никеля и скандия в латеритной коре выветривания.

Ключевые слова: Зимбабве, региональная геология, кора выветривания, россыпи, цифровая модель рельефа

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: грант Минобрнауки РФ «Создание цифровой прогнозно-минералогической основы Республики Зимбабве с использованием данных дистанционного зондирования и последующего выявления тектонических и флюидоразрывных признаков структур, контролирующих распределение месторождений минерального сырья»;

государственное задание Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. Н.П. Лаврова Уральского отделения Российской академии наук (проект № 122011300380-5).

Для цитирования: Игнатов П.А., Полякова Е.В., Минеев А.Л., Малютин С.А. Геоморфометрический анализ цифровой модели рельефа Зимбабве и вопросы экзогенной металлогении. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2024;66(4):89—100. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-4-89-100>

Статья поступила в редакцию 17.06.2024

Принята к публикации 13.12.2024

Опубликована 23.12.2024

* Автор, ответственный за переписку

GEOMORPHOMETRIC ANALYSIS OF ZIMBABWE' DIGITAL ELEVATION MODEL AND ISSUES OF EXOGENIC METALLOGENY

PETR A. IGNATOV^{1,*}, ELENA V. POLYAKOVA², ALEXANDER L. MINEEV², SERGEY A. MALYUTIN¹

¹ *Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia*

² *Federal Research Center for Integrated Arctic Studies named after Academician N.P. Laverov,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
20 Nikolsky ave., Arkhangelsk 163020, Russia*

ABSTRACT

Background. The raw material base of the Republic of Zimbabwe covers numerous endogenic deposits of chromium, nickel, copper, platinum, gold, diamonds, and other minerals. Exogenic deposits are of less occurrence. Most exogenic nickel deposits in the weathering crust and gold ore placers have reached their point of exhaustion. However, there remain prospects for discovering new objects, which determines the relevance of forecasting and prospecting of hidden exogenic deposits in Zimbabwe.

Aim. A geomorphometric analysis of a digital elevation model (DEM) of Zimbabwe with a view to forecasting and prospecting exogenic mineral deposits.

Materials and methods. A digital elevation model (DEM) of the Republic of Zimbabwe was constructed using 120 scenes of the SRTM Void Filled global DEM (SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) version with filled areas of missing data) with a spatial resolution of 3 arcseconds (~90 meters per pixel). The data was obtained through the EarthExplorer service (<https://earthexplorer.usgs.gov>) from the USGS (US Geological Survey). All operations were performed in the open-access SAGA GIS software (<http://www.saga-gis.org>).

Results. Prospects for discovering exogenic deposits formed in the Neogene-Quaternary period can be assessed by calculating the geomorphometric parameters of the terrain. The conducted analysis of the DEM of Zimbabwe established that its terrain contains the following regional elements of the geological structure: outcrops of the Archean basement, the Great Dyke, Proterozoic formations of the folded framework of the basement, rocks of the Mesozoic and Cenozoic cover. Large terrain segments contain metallogenic taxa, including the Zimbabwean Archean endogenic ore belt. The main watershed divides the area into two geomorphologically different — north-western and south-eastern — parts.

Conclusion. Large terrain segments of the area under study are shown to contain metallogenic taxa, including the Zimbabwean Archean ore belt. An assumption is made that buried placers of gold and platinum, as well as redeposited deposits of cobalt, nickel, and scandium in the lateritic weathering crust should be widespread northwest of the main watershed.

Keywords: Zimbabwe, regional geology, weathering crust, placers, digital elevation model

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Financial disclosures: grant from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation “Creation of a digital predictive mineragenic framework for the Republic of Zimbabwe using remote sensing data and subsequent identification of tectonic and fluid-fracturing features of structures controlling the distribution of mineral deposits”; state Assignment from the N.P. Laverov Federal Research Center for Integrated Arctic Studies of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (project No. 122011300380-5).

For citation: Ignatov P.A., Polyakova E.V., Mineev A.L., Malyutin S.A. Geomorphometric analysis of Zimbabwe’ digital elevation model and issues of exogenic metallogeny. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024;66(4):89—100. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-4-89-100>

Manuscript received 17 June 2024

Accepted 13 December 2024

Published 23 December 2024

* Corresponding author

В Республике Зимбабве выявлены и отрабатываются многочисленные эндогенные месторождения золота, платиноидов, хромитов, меди, никеля, бериллия, лития, вольфрама, олова и других металлов, которые составляют основу ее минерально-сырьевой базы. Кроме них имеется множество экзогенных месторождений, представленных, главным образом, россыпями золота и платины, а также латеритной корой выветривания с промышленными концентрациями никеля и кобальта. Большинство месторождений выходит на поверхность и к настоящему времени частично или полностью отработаны.

Следует отметить, что экзогенная металлогения Зимбабве практически не изучена, какие-либо публикации на эту тему отсутствуют. Вместе с тем перспективы выявления новых экзогенных месторождений далеко не исчерпаны. Актуальность выделения новых площадей для поиска экзогенных месторождений, особенно тех, которые не выходят на поверхность, очевидна.

Основой выделения и оценки таких перспективных площадей может являться цифровое моделирование рельефа (ЦМР) и его детальный геоморфометрический анализ. Цифровое моделирование и геоморфометрический анализ рельефа широко применяются в различных сферах человеческой деятельности, в том числе и науках о Земле. Несомненными достоинствами цифрового моделирования являются доступность исходного материала, объективность количественных методов расчета и единовременный охват больших территорий [5].

Интерес представляет отражение в цифровой модели рельефа главных элементов геологического строения территории и соответствующих им металлогенических таксонов. Кроме того, геоморфометрический анализ рельефа может помочь в выделении перспективных площадей для обнаружения погребенных на неоген-четвертичном этапе месторождений, в том числе россыпей и переотложенной рудоносной коры выветривания.

Статья подготовлена в рамках исследований, выполняемых по гранту Минобрнауки РФ «Создание цифровой прогнозно-минерагенической основы Республики Зимбабве с использованием данных дистанционного зондирования и последующего выявления тектонических и флюидоразрывных признаков структур, контролирующих распределение месторождений минерального сырья». Разработка ЦМР территории Зимбабве проведена в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. Н.П. Лаврова Уральского отделения Российской академии наук (проект № 122011300380-5).

Материалы и методы

Для построения цифровой модели рельефа территории республики Зимбабве были использованы 120 сцен глобальной ЦМР SRTM Void Filled (версия SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) с заполненными областями отсутствующих данных) с пространственным разрешением 3 угловые секунды (~90 метров в пикселе). Данные были получены

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ / GEOLOGY AND PROSPECTING FOR SOLID MINERAL DEPOSITS

посредством сервиса EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov>) от USGS (Служба геологической съемки США). Все операции осуществлялись в свободно распространяемом программном обеспечении SAGA GIS (<http://www.saga-gis.org>).

Цифровые модели рельефа, получаемые с помощью радарного дистанционного зондирования, в своем исходном виде зачастую содержат зернистый (высокочастотный) шум, или спекл-шум, который снижает качество изображения [9]. Поэтому после объединения сцен в мозаику с помощью модуля Grid/Grid System/Mosaicking производилось устранение спекл-шума с применением модуля Grid/Filter/Mesh Denoise [10, 11]. Таким образом, была построена и подготовлена к дальнейшему геоморфометрическому анализу однородная ЦМР территории Зимбабве.

ЦМР с исходным разрешением порядка 90 м относится к категории данных дистанционного зондирования среднего пространственного разрешения. Такое разрешение позволяет выделять локальные морфоструктуры на относительно небольших участках местности. Однако, учитывая площадь территории Зимбабве (около 400 тыс. км²), затрудняется анализ более крупных структур протяженностью в несколько десятков и сотен километров. Одним из распространенных приемов решения данной проблемы является апскейлинг (upscaling) — масштабирование растровых данных до более грубого пространственного разрешения. При этом дан-

ные из нескольких ячеек раstra с высоким пространственным разрешением объединяются в ячейки раstra с более низким разрешением [6]. Основным требованием к выбору оптимального разрешения модели является соблюдение геометрической точности с сохранением подобия качественного и количественного состава геобъектов на единицу площади [4]. В данном исследовании ЦМР приведена к пространственному разрешению 1000 м с помощью модуля Grid/Grid System/Resampling. Визуально отличительные особенности моделей с исходным разрешением и полученным с применением процедуры апскейлинга продемонстрированы на рисунке 1. Такая генерализация позволила снять локальные аномалии и при последующем анализе выделить региональные структуры.

Результаты

Зимбабве расположена на юге Африки между реками Замбези и Лимпопо. Административно граничит на северо-западе с Замбией, на востоке — с Мозамбиком, на юге с Южно-Африканской Республикой (ЮАР), на юго-западе — с Ботсваной. Столица Зимбабве — город Хараре.

Более половины территории Зимбабве располагается на высотах от 1000 до 1500 м (рис. 2). С северо-востока на юго-запад республику пересекают докембрийские цокольные слабоволнистые плато Машона и Матабеле, совместно формирующие золоторудный пояс, который ступенчато

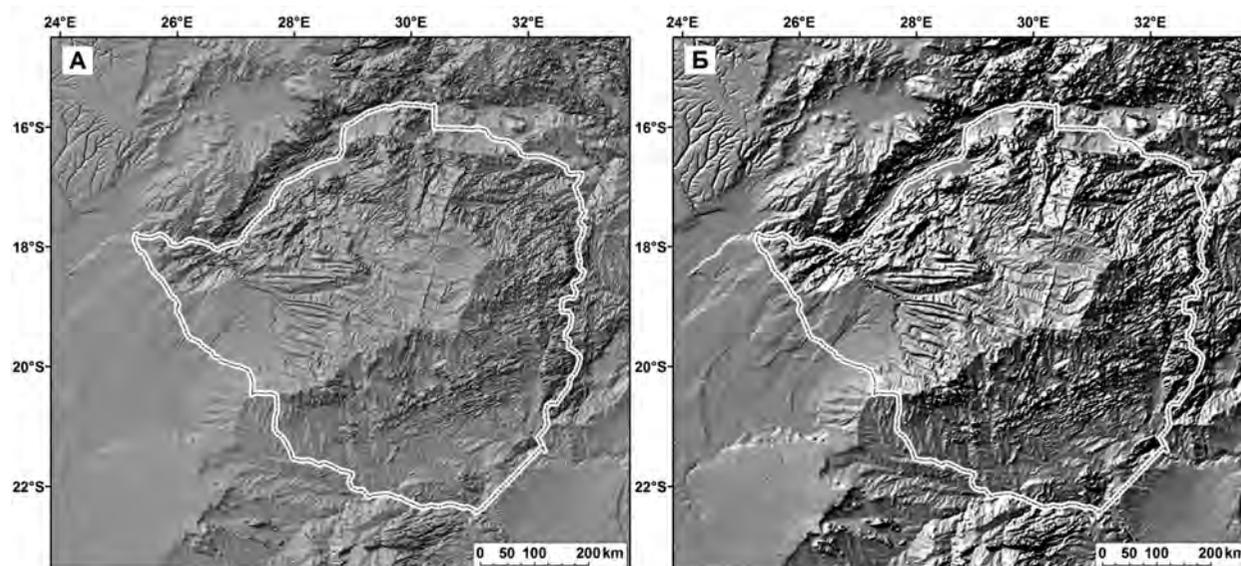


Рис. 1. Теневая отмывка рельефа: А — на ЦМР с исходным разрешением (90 м), Б — на ЦМР с разрешением 1000 м
Fig. 1. Shaded relief: A — on the DEM with the initial resolution (90 m), B — on the DEM with a resolution of 1000 m

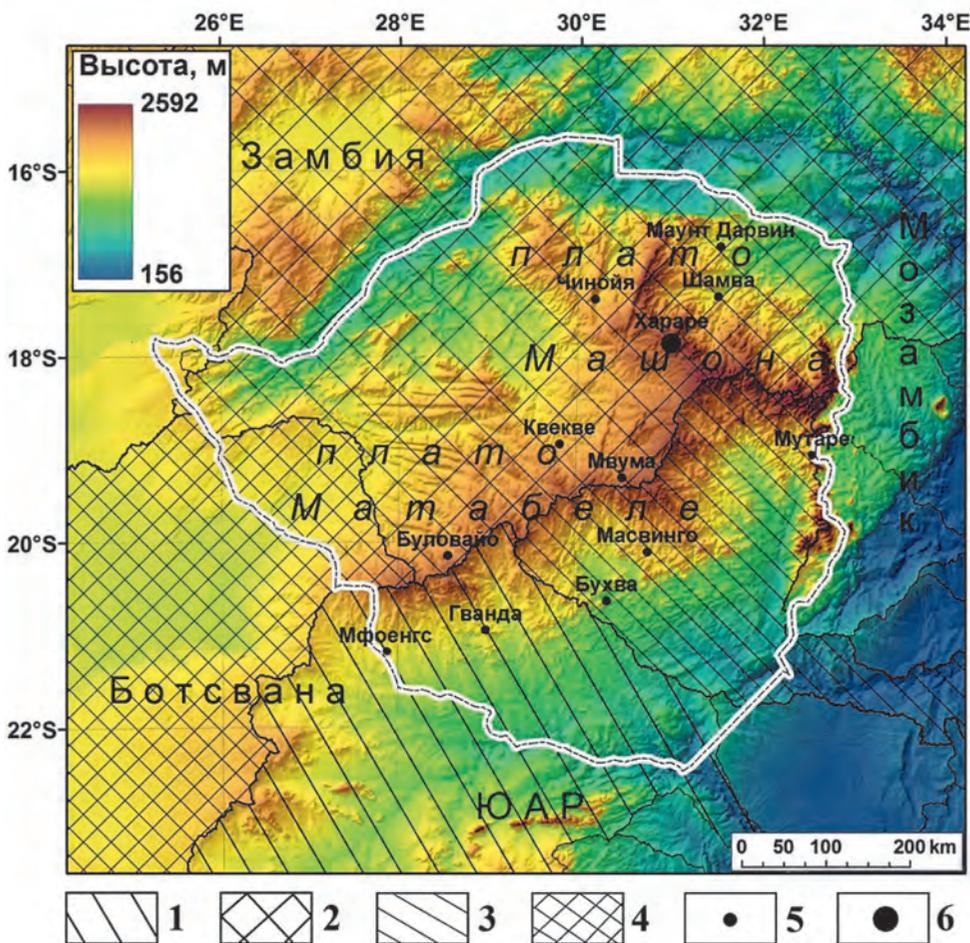


Рис. 2. Зимбабве на цифровой модели рельефа: 1—4 — водосборные бассейны рек: 1 — Лимпопо, 2 — Замбези, 3 — Саве, 4 — Ната; 5 — основные города, 6 — Хараре (столица)

Fig. 2. Zimbabwe on a digital terrain model: 1—4 — catchment basins of rivers: 1 — Limpopo, 2 — Zambezi, 3 — Sava, 4 — Nata; 5 — main cities, 6 — Harare (capital)

понижается к песчаным равнинам реки Замбези на севере и междуречьям Лимпопо и Саве на юге. Самая высокая точка Зимбабве — гора Иньянгани (2592 м) находится на востоке республики в горах Иньянга. Широкая холмистая возвышенность, ориентированная с юго-запада на северо-восток, образует крупный водораздел между водосборными бассейнами реки Замбези на севере и реками Лимпопо и Саве на юге. На западе формируется водосборный бассейн реки Ната, которая течет в направлении пустыни Калахари в Ботсване.

Главным элементом геологического строения территории Зимбабве, расположенной в южной части докембрийской Африканской платформы, является архейский кратон Зимбабве, занимающий большую восточную часть страны площадью 0,25 млн км². Он представляет собой крупный блок архейской континентальной коры,

окруженный со всех сторон протерозойскими мобильными поясами. На юге это пояс Лимпопо, на востоке — Мозамбикский, на севере — пояс Замбези, а на западе — пояс Магонди.

Внутри кратона выделяют ядро, сложенное мезоархейскими гранито-гнейсами и зеленокаменными образованиями (блок Родесдейл-Токве) и остальную часть, представленную неоархейскими зеленокаменными поясами с интрузивными массивами гранитоидов. Все региональные структуры хорошо выражены в ЦМР (рис. 3).

В пределах протерозойских мобильных поясов в западной, северной и южной частях территории Зимбабве выделяются внутренне впадины, выполненные мезозойскими осадочными и вулканогенными отложениями супергруппы Кару, прорванными позднеюрскими гранитоидами. Эти впадины являются частями

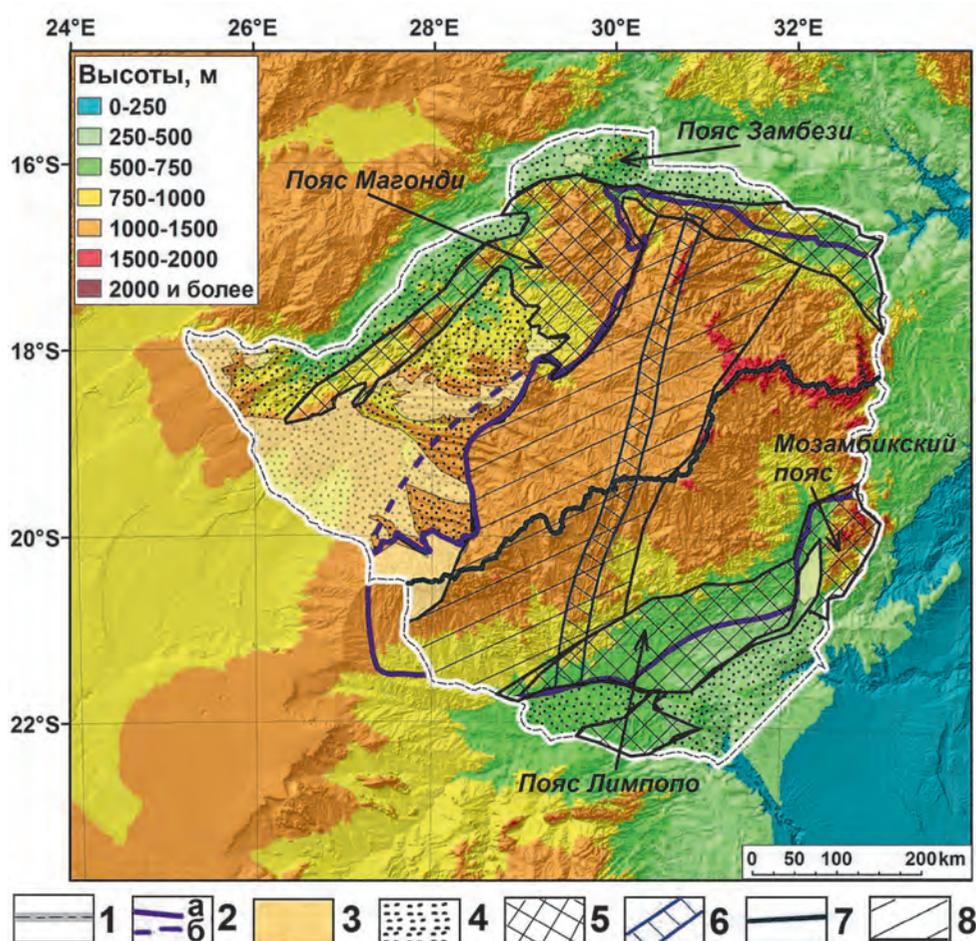


Рис. 3. Интервалы высот (м) и геологическая схема территории Зимбабве: 1 — административная граница республики; 2 — граница архейского кратона Зимбабве: а — основная, б — перекрытая; 3 — четвертичные отложения; 4 — мезозойские отложения группы Кару; 5 — протерозойские мобильные пояса; 6 — Великая дайка; 7 — главный водораздел; 8 — территория зимбабвийского рудного пояса, сложенная гранито-гнейсами мезоархея и неоархейскими гранит-зеленокаменными образованиями

Fig. 3. Elevation ranges (m) and geological map of Zimbabwe territory: 1 — the administrative border of the republic; 2 — the border of the Archean craton of Zimbabwe: a — main, b — overlain; 3 — Quaternary deposits; 4 — Mesozoic deposits of the Karoo group; 5 — Proterozoic mobile belts; 6 — Great Dyke; 7 — main watershed; 8 — the territory of the Zimbabwean ore belt, composed of granite-gneiss Mesoarchean and Neoproterozoic granite-greenstone formations

обширного бассейна рифтогенного происхождения, образовавшегося во время формирования и распада Пангеи. В западной части Зимбабве комплекс Кару перекрыт кайнозойскими континентальными отложениями группы Калахари. В центральной части кратон с севера на юг пересекает расслоенный магматический массив неоархейского возраста Великая дайка протяженностью более 500 км и максимальной шириной до 12 км.

В пределах республики Зимбабве выделен рудный пояс (Cu, Ni, Pt, Au, Sb, Fe, Cr, W, Sn, Li, Be), протягивающийся с северо-востока на юго-запад через весь кратон (рис. 3). Этот пояс

соответствует распространению наиболее продуктивных неоархейских зеленокаменных поясов. Внутри центральной части пояса выделено 5 металлогенических областей овальной формы: Маунт Дарвин, Хараре-Шамва, Мидлендс, Булавайо и Гванда. Кроме того, выделяются семь металлогенических зон линейной ориентации, соответствующих отдельным зеленокаменным поясам [2].

Главный водораздел Зимбабве, протягивающийся в северо-восточном направлении через всю территорию страны, делит рудный пояс на две части: большую северо-западную и меньшую юго-восточную. В первой располагаются основные металлогенические области

с многочисленными месторождениями, а во второй — лишь металлогеническая область Гванда и ряд металлогенических зон.

Рельеф большей части территории страны обусловлен влиянием двух основных циклов эрозии: африканского и постафриканского, произошедших после распада Гондваны. Цикл африканской эрозии начался с разрушения Гондваны, а последующий (постафриканский) был инициирован позднепалеогеновым поднятием вдоль линии современного центрального водораздела. Центральный водораздел Зимбабве представляет собой асимметричную эпэйрогенную флексуру позднего палеогена [7]. Дренажная система к северу от водораздела (водосборный бассейн реки Замбези) и связанный с ней морфологический облик этой территории существенно отличаются от таковых к югу (водосборные бассейны Лимпопо и Саве). Это отражается и в основных геоморфометрических параметрах рельефа (рис. 4).

Территория, расположенная к северо-западу от главного водораздела, характеризуется развитой дренажной сетью с извилистыми реками, текущими в широких неглубоких и длинных выработанных долинах. Это плоская слабохолмистая равнина с общим уклоном, не превышающим 10° . Превалируют северные экспозиции склонов и направлений потоков. Высоты варьируют в интервале от 1000 до 1500 м.

С продвижением на север-северо-восток высоты главного водораздела увеличиваются от 1700 м (хребет Умвукве, центральный Машоналенд на севере) до 2500 м (горы Иньянга на востоке). По краю

плато формируется откос Замбези с уклоном порядка 30 градусов. Долина реки Замбези представляет собой равнину с низким рельефом и высотами, не превышающими 500 м.

Территория, расположенная к юго-востоку от главного водораздела, характеризуется более молодой дренажной системой. Реки в большинстве своем имеют крутые уклоны (до 30 — 40°), более глубоко врезанные и прямолинейные долины. Преобладающие направления потоков и ориентации склонов — южные и юго-западные.

Современный ландшафт юго-восточной территории — это плосковершинная равнина с многочисленными одновершинными останцами. Подобные останцовые элементы называются инзельбергами и интерпретируются как денудационные остатки некогда более обширных возвышенностей, образовавшиеся в результате глубокого выветривания и устойчивых тектонических условий с последующим тектоническим поднятием [8]. В геологическом отношении территория развития подобных морфоэлементов охватывает часть сочленения гранит-зеленокаменного рельефа кратона Зимбабве и метаморфических пород северной окраины Подвижного пояса Лимпопо. Для этой зоны характерна значительная расчлененность рельефа, она вытянута параллельно главному водоразделу, высоты порядка 750—1000 м. Плато Матабеле постепенно понижается к югу и юго-востоку до 500—250 м. Здесь нет крутых уступов и уклонов. И только к востоку от района Масвинго и р. Саби (приток р. Саве)

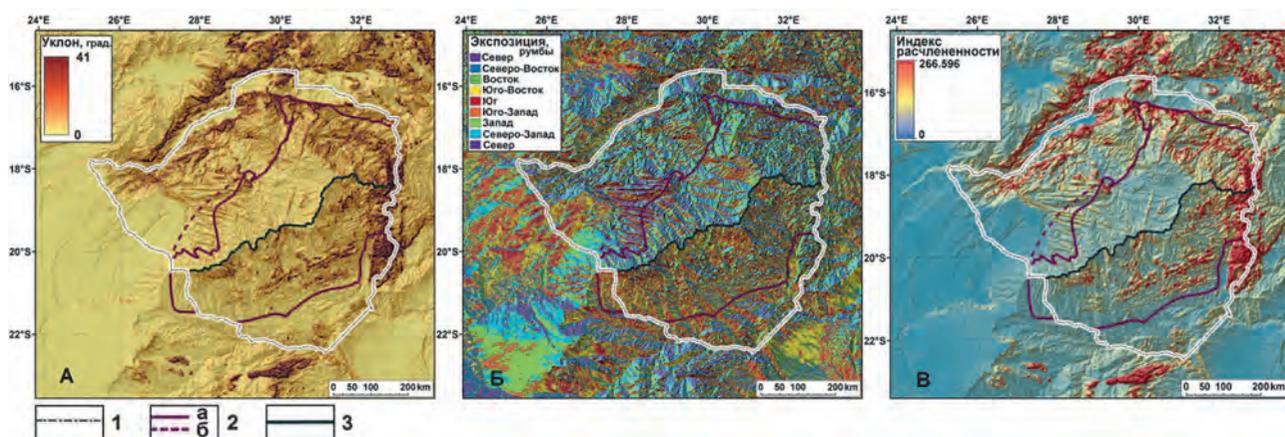


Рис. 4. Геоморфометрические параметры рельефа: А — уклон поверхности, Б — экспозиция склонов, В — индекс расчлененности рельефа; 1 — административная граница республики; 2 — граница архейского кратона Зимбабве: а — основная, б — перекрытая; 3 — главный водораздел

Fig. 4. Geomorphometric relief parameters: А — surface slope, Б — aspect, В — terrain ruggedness index; 1 — administrative border of the republic; 2 — boundary of the Archean craton of Zimbabwe: а — main, б — overlapped; 3 — main watershed

формируется горный отрог с высотами до 2000 м и выше. Это зона сочленения кратона и протерозойского Мозамбикского пояса. Ориентация склонов отрога становится западной и северо-западной, а углы наклона поверхностей достигают 35—40°.

Великая дайка под острым углом (порядка 30°) пересекает главный водораздел. Одновременно по обе стороны главного тела дайки развивались трещины-сателлиты, по которым внедрялись маломощные дайки сходного возраста и состава [1]. С внедрением данного протяженного ультрамафитового массива завершается архейская история развития кратона Зимбабве и начинается протерозойская.

Великая дайка отчетливо отражается в современном рельефе. Главный водораздельный хребет делит ее на две части — северную и южную. В северной части плато Машона дайка выражена наиболее ярко. Здесь она формирует хребет Умвукве с высотами до 2000 м, имеет крутые уклоны, склоны ориентированы на юго-запад и северо-восток соответственно. Далее, с продвижением в центральную часть и на юг дайка несколько теряет свою высоту, сохраняя ее на всем остальном протяжении в интервалах от 1000 до 1500 м. В центральной части дайка перпендикулярно сечет длинные пологие долины рек водосборного бассейна Замбези, выдаваясь в виде стены в равнинном рельефе территории. К югу от главного водораздела дайка становится более раздробленной, расчлененной и постепенно теряется в останцовом рельефе в зоне сочленения кратона Зимбабве и подвижного пояса Лимпопо. Северо-западную и юго-восточную экспозицию склонов своих стен Великая дайка сохраняет на всем протяжении.

Таким образом, современный рельеф территории Зимбабве представляет собой плоскогорную равнину с денудационными низко- и средневысотными горами и ступенчатостью, обусловленной циклическим развитием денудационных поверхностей [3, 10]. Главные возвышенности, понижения поверхности и крупные линейные формы соответствуют региональным геологическим элементам: архейскому кратону Зимбабве с гранит-зеленокаменными поясами; неоархейской Великой дайке; обрамляющим кратон складчатым поясам; синеклизам, выполненным вулканогенно-осадочными породами Карру, меловыми угленосными отложениями и кайнозойскими песками Калахари. Этим региональным элементам соответствуют крупные металлогенические таксоны:

металлогенические и рудные пояса, металлогенические области и зоны с эндогенными месторождениями.

В этой связи интерес представляет оценка экзогенной металлогении неоген-четвертичного этапа развития региона. Длительное устойчивое поднятие центральной части кратона Зимбабве, в том числе и в кайнозое, предопределяет значительный эрозионный срез архейских образований, включающих многочисленные эндогенные месторождения важных россыпеобразующих компонентов — золота и платиноидов. Соответственно, во время формирования главного водораздела в континентальные бассейны промежуточной аккумуляции поступало много разрушенного материала первичных рудных тел и формировались многочисленные россыпи благородных металлов.

Исходя из отмеченных существенно отличающихся форм аллювиальных равнин севернее и южнее главного водораздела следует рассматривать и разные типы россыпей. На севере должно быть много погребенных россыпей ближнего и дальнего сноса. На юге должны преобладать современные россыпи. Необходимо иметь в виду, что коренные источники россыпей золота, включающие крупные месторождения Кэм энд Мотор, Глоб энд Феникс, ряд средних по запасам и сотни мелких месторождений в своем большинстве сосредоточены в двух металлогенических областях Мидлендс и Булавайо. Они входят в северо-западные равнины; соответственно, потенциал погребенных россыпей золота в них гораздо больший по сравнению с юго-восточными равнинами (рис. 5).

Примером вероятного наличия погребенных россыпей может служить район долины реки Мупфуре, примыкающий с востока к Великой дайке и расположенный в 10 км на северо-запад от г. Мубйяра. Восточнее по этой субширотной долине в 40 км расположено рудное поле, включающее три месторождения золота: Беатрис, Лдойс и Рома с запасами от 1 до 10 т. Очевидно, что вертикально залегающая мощная дайка служила громадной плотиной, вблизи которой должны были накапливаться золотые россыпи, перекрытые впоследствии четвертичными отложениями.

Необходимо отметить, что источниками россыпей золота и платиноидов могли служить и магматические месторождения Великой дайки (Хартли, Зинка и Нгези), которые также расположены на северо-западных склонах главного водораздела. Здесь можно ожидать большие ресурсы комплексных золото-платиновых россыпей.

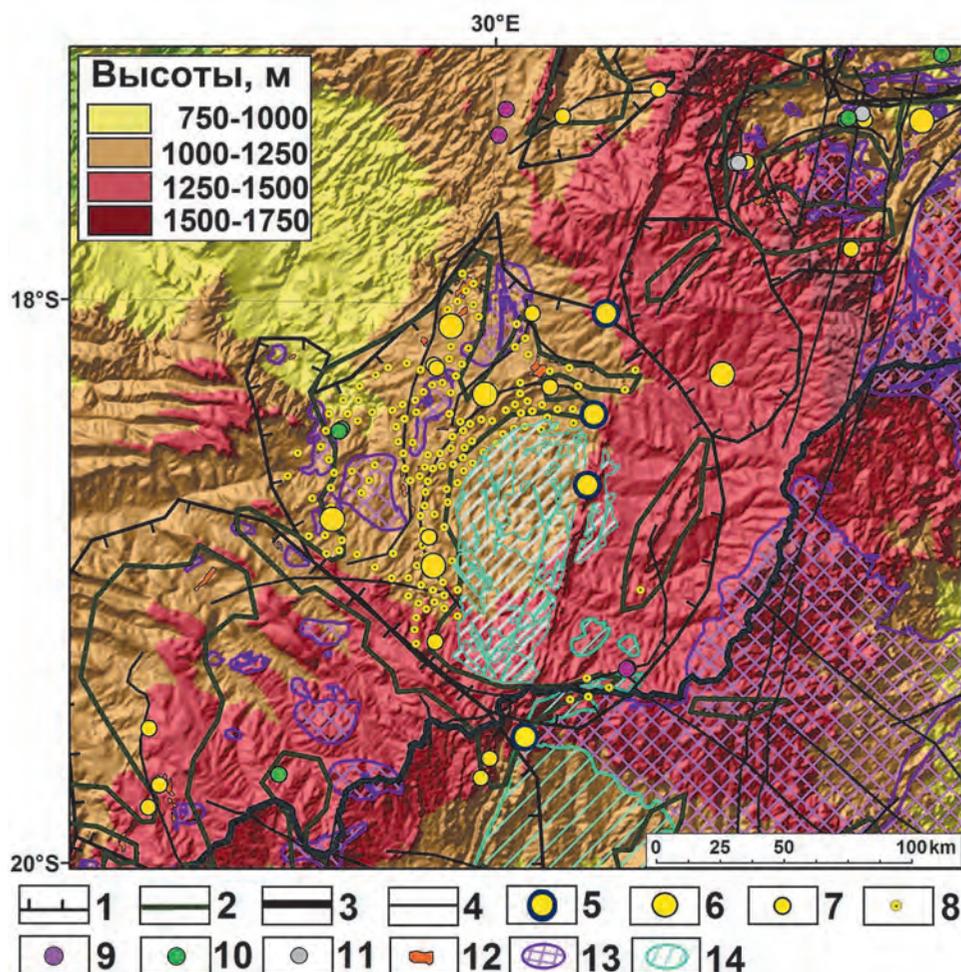


Рис. 5. Интервалы высот и металлогенические золоторудные области рудного пояса Зимбабве: 1 — граница золоторудного района; 2 — границы зеленокаменных поясов; 3 — главный водораздел; 4 — основные разломы; 5—10 — месторождения: 5 — платины, 6 — золота крупные, 7 — золота средние, 8 — золотоносные проявления (жилы), 9 — меди, 10 — никеля, 11 — вольфрама; 12 — тела порфировидных гранитов; 13 — неоархейские граниты; 14 — мезоархейские граниты блока Родесдейл-Токве

Fig. 5. Height ranges and metallogenic gold ore regions of the Zimbabwe ore belt: 1 — the border of the gold mining region; 2 — the borders of the greenstone belts; 3 — the main watershed; 4 — the main faults; 5—10 — deposits: 5 — platinum, 6 — large gold, 7 — medium gold, 8 — gold-bearing occurrences (veins), 9 — copper, 10 — nickel, 11 — tungsten; 12 — bodies of porphyritic granites; 13 — Neoproterozoic granites; 14 — Mesoarchean granites of the Rodesdale-Tokwe block

В область юго-восточных долин золото могло поступать из нескольких средних и мелких месторождений, расположенных на юге области Мидлендс и юго-востоке области Булавайо (рис. 5).

Очевидно, что за более чем двухсотлетний период освоения месторождений золота Зимбабве современные россыпи практически отработаны. Однако ресурсы погребенных на десятки метров россыпей могут быть значительными и представлять промышленный интерес.

Помимо погребенных россыпей, районы долинных равнин на северо-западе являются

предпочтительными для формирования крупных месторождений кобальта, никеля и скандия в переотложенной коре выветривания по ультраосновным породам древних зеленокаменных поясов. Известно, что роль таких месторождений в мировой добыче этих металлов весьма значительна [12, 13].

Также надо отметить, что именно для геоморфологических условий северо-западных равнин характерно развитие на сульфидных золоторудных месторождениях мощных в десятки метров площадных и чаще линейных зон окисления

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ / GEOLOGY AND PROSPECTING FOR SOLID MINERAL DEPOSITS

с подзонами вторичного сульфидного обогащения, характеризующимися высокими концентрациями золота. Этот факт следует учитывать при интерпретации геолого-геофизических материалов и оценке перспектив территории на выявление погребенных россыпей.

Заключение

С использованием современных методов обработки данных дистанционного зондирования Земли построена цифровая модель рельефа Зимбабве, являющаяся исходным материалом для геоморфометрического анализа, основанного на объективных количественных методах расчета.

Установлено, что в рельефе хорошо выражены региональные элементы геологического строения: породы архейского кратона Зимбабве, Великая дайка, протерозойские образования

складчатого обрамления фундамента, породы мезозойского и кайнозойского чехла.

Показано, что в крупных сегментах рельефа отражены и металлогенические таксоны, включая Зимбабвийский архейский рудный пояс.

В центральной части Зимбабве обосновано наличие двух типов аллювиально-денудационных равнин, разделенных главным водоразделом северо-восточного простирания. На северо-западе это пологое плато с широкими протяженными долинами и небольшим в 10° уклоном. На юго-востоке плато с контрастным рельефом, узкими долинами, эрозионными останцами типа столовых гор и значительным уклонами в 30° .

Предположено, что северо-западнее главного водораздела должны быть широко распространены погребенные золото-платиновые россыпи и месторождения кобальта, никеля и скандия в перетолженной латеритной коре выветривания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов С.В. Великая дайка Зимбабве. Природа. 2011. № 7. С. 47—51.
2. Игнатов П.А., Малютин С.А., Ланчак М.М. Основные черты исторической и региональной металлогении кратона Зимбабве. Горный журнал. 2024. № 5. С. 28—37.
3. Лебедева Е.В. Поверхности выравнивания Южной Африки: эволюция и сохранность. Геоморфология. 2011. № 1. С. 48—58.
4. Никишин Д.А. Процессы генерализации в аналоговой и цифровой картографии. Системы и средства информатики. 2018. Т. 28. № 3. С. 204—216.
5. Полякова Е.В. Геоморфометрический подход в геоэкологических исследованиях северных территорий страны. Успехи современного естествознания. 2018. № 3. С. 117—122.
6. Gann D. Quantitative spatial upscaling of categorical information: The multi-dimensional grid-point scaling algorithm. *Methods in Ecology and Evolution*. 2019. Т. 10. No. 12. P. 2090—2104.
7. Moore A.E., Cotterill F. P. D., Broderick T., Plowes D. Landscape evolution in Zimbabwe from the Permian to present, with implications for kimberlite prospecting. *South African Journal of Geology*. 2009. Т. 112. No. 1. P. 65—88.
8. Römer W. The distribution of inselbergs and their relationship to geomorphological, structural and lithological controls in Southern Zimbabwe. *Geomorphology*. 2005. Т. 72. No. 1—4. P. 156—176.
9. Stevenson J.A., Sun X., Mitchell N.C. Despeckling SRTM and other topographic data with a denoising algorithm. *Geomorphology*. 2010. Т. 114. No. 3. P. 238—252.
10. Schoenberg R., Nagler Th.F., Gnos E., Kramers J.D., Kamber B.S. The Source of the Great Dyke, Zimbabwe, and Its Tectonic Significance: Evidence from Re-Os Isotopes. *The Journal of Geology*. 2003. Vol. 111, P. 565—578.
11. Sun X., Rosin P. L., Martin R., Langbein F. Fast and effective feature-preserving mesh denoising. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*. 2007. Vol. 13. No. 5. P. 925—938. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2007.1065>
12. Teitler Y., Cathelineau M., Ulrich M., Ambrosi J.P., Munoz M., Sevin B. Petrology and geochemistry of scandium in New Caledonian Ni-Co laterites. *Journal of Geochemical Exploration*. 2019. Т. 196. P. 131—155. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.10.009>
13. Wang Z., Li M.Y. H., Liu Z.R., Zhou M. Scandium: Ore deposits, the pivotal role of magmatic enrichment and future exploration. *Ore Geology Reviews*. 2021. Vol. 128. 103906pp. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103906>

REFERENCES

1. Belov S.V. The Great Dyke of Zimbabwe. *Priroda*. 2011. No. 7. P. 47—51 (In Russ.).
2. Ignatov P.A., Malyutin S.A., Lanchak M.M. The main features of regional metallogeny of the Zimbabwe Craton. *Gornyi Zhurnal*. 2024. No. 5. P. 28—37 (In Russ.).

3. Lebedeva E.V. The leveling surfaces of South Africa: evolution and preservation. *Geomorphology*. 2011. No. 1. P. 48—58 (In Russ.).
4. Nikishin D.A. Generalization processes in analog and digital cartography. *Computer science systems and tools*. 2018. Vol. 28. No. 3. P. 204—216 (In Russ.).
5. Polyakova E.V. Geomorphometric approach in geocological studies of the northern territories of the country. *The successes of modern natural science*. 2018. No. 3. P. 117—122 (In Russ.).
6. Gann D. Quantitative spatial upscaling of categorical information: The multi-dimensional grid-point scaling algorithm. *Methods in Ecology and Evolution*. 2019. T. 10. No. 12. P. 2090—2104.
7. Moore A.E., Cotterill F. P. D., Broderick T., Plowes D. Landscape evolution in Zimbabwe from the Permian to present, with implications for kimberlite prospecting. *South African Journal of Geology*. 2009. T. 112. No. 1. P. 65—88.
8. Römer W. The distribution of inselbergs and their relationship to geomorphological, structural and lithological controls in Southern Zimbabwe. *Geomorphology*. 2005. T. 72. No. 1—4. P. 156—176.
9. Stevenson J.A., Sun X., Mitchell N.C. Despeckling SRTM and other topographic data with a denoising algorithm. *Geomorphology*. 2010. T. 114. No. 3. P. 238—252.
10. Schoenberg R., Nagler Th.F., Gnos E., Kramers J.D., Kamber B.S. The Source of the Great Dyke, Zimbabwe, and Its Tectonic Significance: Evidence from Re-Os Isotopes. *The Journal of Geology*. 2003. Vol. 111, P. 565—578.
11. Sun X., Rosin P. L., Martin R., Langbein F. Fast and effective feature-preserving mesh denoising. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*. 2007. Vol. 13. No. 5. P. 925—938. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2007.1065>
12. Teitler Y., Cathelineau M., Ulrich M., Ambrosi J.P., Munoz M., Sevin B. Petrology and geochemistry of scandium in New Caledonian Ni-Co laterites. *Journal of Geochemical Exploration*. 2019. T. 196. P. 131—155. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.10.009>
13. Wang Z., Li M.Y. H., Liu Z.R., Zhou M. Scandium: Ore deposits, the pivotal role of magmatic enrichment and future exploration. *Ore Geology Reviews*. 2021. Vol. 128. 103906pp. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103906>

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Игнатов П.А. — разработал концепцию, методологию, проведение исследования, провел редактирование рукописи, утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Полякова Е.В. — провела исследования, верифицировала данные, утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Минеев А.Л. — провел исследования, верифицировал данные, утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Малютин С.А. — провел исследования, верифицировал данные, утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Petr A. Ignatov — development of the concept, methodology, research, editing of the manuscript, approved the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Elena V. Polyakova — methodology, research, approved the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Alexander L. Mineev — methodology, research, approved the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Sergey A. Malyutin — methodology, research, approved the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Игнатов Петр Алексеевич* — доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии месторождений полезных ископаемых ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: ignatovpa@mgri.ru
тел.: +7 (495) 461-37-77
SPIN-код: 7893-1477
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7956-580X>

Petr A. Ignatov* — Dr. of Sci. (Geol.-Min.), Professor, Department of Geology of Mineral Deposits Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
e-mail: ignatovpa@mgri.ru
tel.: +7 (495) 461-37-77
SPIN-code: 7893-1477
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7956-580X>

Полякова Елена Викторовна — доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук.
20, Никольский проспект, г. Архангельск 163020, Россия
e-mail: lenpo26@yandex.ru
SPIN-код: 1362-3404
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1150-1778>

Elena V. Polyakova — Dr. of Sci. (Geol.-Min.), Leading Researcher, Federal Research Center for Integrated Arctic Studies named after Academician N.P. Laverov, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.
20, Nikolsky ave., Arkhangelsk 163020, Russia
e-mail: lenpo26@yandex.ru
SPIN-code: 1362-3404
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1150-1778>

Минеев Александр Леонидович — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук.
20, Никольский проспект, г. Архангельск 163020, Россия
e-mail: [mineew.al@gmail.com](mailto:mineeew.al@gmail.com)
SPIN-код: 6676-4183
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3303-6520>

Alexander L. Mineev — Cand. of Sci. (Geol.-Min.), Senior Researcher, Federal Research Center for Integrated Arctic Studies named after Academician N.P. Laverov, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.
20, Nikolsky ave., Arkhangelsk 163020, Russia
e-mail: [mineew.al@gmail.com](mailto:mineeew.al@gmail.com)
SPIN-code: 6676-4183
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3303-6520>

Малютин Сергей Александрович — кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии месторождений полезных ископаемых ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: malyutinsa@mgri.ru
SPIN-код: 4968-3696
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4508-4805>

Sergey A. Malyutin — Cand. of Sci. (Geol.-Min.), Associate Professor, Department of Geology of Mineral Deposits, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
e-mail: malyutinsa@mgri.ru
SPIN-code: 4968-3696
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4508-4805>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author