

Морфоструктура территории Республики Бурунди

©2024 А. И. Трегуб[✉], Ж. К. Нидорера, Б. Барихута

*Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, 394018, Воронеж, Российская Федерация*

Аннотация

Введение: научная проблема при изучении морфоструктуры территории Республики Бурунди состоит в выяснении ее соотношения с тектонической структурой фундамента. Цель статьи – выделить основные элементы морфоструктуры и оценить их роль в отражении структуры фундамента.

Методика: объект исследования расположен в пределах западной ветви Восточно-Африканской рифтовой системы, к востоку от оз. Танганьика. Последовательность исследования включала описание основных подразделений рельефа территории, анализ геологического строения докембрийского фундамента (разреза и литологии пород, а также выделение структурных этажей, изучение их соотношения друг с другом и описание основных черт внутреннего строения). Следующий этап предусматривал исследование морфоструктуры территории, выделение ее литоморфной и неотектонической составляющей. На основе визуального дешифрирования космических снимков выделены линейные и кольцевые морфоструктуры. При дешифрировании в качестве дешифровочного признака использовался плановый рисунок гидросети. Для кольцевых морфоструктур, используя зависимость их размеров от глубины расположения инициирующих очагов, составлена схематическая карта поверхности инициирующих очагов. На последнем этапе проведено сопоставление результатов морфоструктурного анализа с геологией фундамента. Материалами, использованными при выполнении работы, являлись данные геологической съемки территории, космические снимки, цифровая модель рельефа, а также опубликованные материалы.

Результаты и обсуждение: в результате проведенных исследований охарактеризован рельеф территории, который включает (с запада на восток): низменный участок Имбо вдоль восточного берега оз. Танганьика, хребет Конго-Нил, Центральное Плато, полосу относительно пониженных областей на границе с Танзанией – Бурагане, Кумосо, Буйогама. Выполнен анализ геологического строения территории Республики Бурунди. В разрезе пород, слагающих докембрийский фундамент, участвуют образования верхнего, среднего и нижнего протерозоя – архея. Большое значение имеют слои кварцитов, играющие роль бронирующих горизонтов. Западная и северо-западная части территории насыщены гранитоидами, определяющими холмистый характер рельефа. В тектоническом отношении по наличию несогласий территория может быть разделена три структурных этажа, отличающихся внутренним строением. Среди разломов можно выделить надвиговые структуры. В морфоструктуре территории выделяются два ее типа: литоморфная и неотектоническая. Литоморфные элементы отчетливо распознаются на цифровой модели рельефа. При дешифрировании космоснимков часть из выделяемых региональных линейных элементов совпадает с маркирующими слоями. Неотектоническая составляющая морфоструктуры образована восточным бортом рифта оз. Танганьика. Конго-Нильский хребет представляет фрагмент плеча рифтовой структуры. Центральное Плато и прилегающие пониженные участки – фрагменты Африканской платформы.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Трегуб Александр Иванович, e-mail: tregubai@yandex.ru

Заключение: в результате исследований можно сделать следующие выводы: в особенностях морфоструктуры проявляются как литоморфная составляющая, так и неотектоническая. В литоморфной составляющей отчетливо проявляется структура протерозоя. Поле линеаментов, отражает разрывные нарушения фундамента лишь фрагментарно и связано, по-видимому, с неотектоническими разрывами. Для кольцевых элементов глубина инициирующих их очагов может соответствовать глубине расположения гипоцентров землетрясений и, возможно, положению подошвы земной коры. Этот вывод заслуживает особого внимания с методических позиций, и требует дополнительных исследований.

Ключевые слова: Республика Бурунди, морфоструктура, линеаменты, неотектоника.

Для цитирования: Трегуб А. И., Нидорера Ж. К., Барихута Б. Морфоструктура территории Республики Бурунди // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2024. № 3. С. 4–13. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/3/4-13>

Введение

Научная проблема при изучении морфоструктуры территории Республики Бурунди состоит в выяснении ее соотношения с тектонической структурой фундамента.

Цель статьи заключается в выделении основных элементов морфоструктуры и оценке их роли в проявлении структуры докембрийского фундамента.

Методика

Объект исследования расположен в пределах западной ветви Восточно-Африканской рифтовой системы, к востоку от оз. Танганьика. Восточно-Африканская рифтовая система – системы рифтов в Восточной Африке, Красном море и Аденском заливе. Она сформировалась на неотектоническом этапе (в олигоцен – четвертичное время) в центральной части Африканской древней платформы. В межконтинентальных рифтах Красного моря и Аденского залива, начиная с позднего миоцена, происходит образование океанической коры [1]. Эти рифты, пересекаясь с континентальными рифтами во впадине Афар, образуют тройное сочленение. В зоне перегиба между Эфиопским и Кенийским сводами расположен рифт Рудольф, к югу от которого Восточно-Африканская рифтовая система разделяется на Восточную и Западную ветви. Западная ветвь состоит из нескольких кулисами расположенных грабенов. К наиболее крупному из них приурочено озеро Танганьика. Восточнее него находится территория исследований. В районе грабена озера Ньяса обе ветви соединяются и продолжают к югу единой цепью грабенов, уходящих в Индийский океан (рис. 1).

Последовательность исследования включала описание основных подразделений рельефа территории, анализ геологического строения докембрийского фундамента (разреза и литологии пород, а также выделение структурных этажей, изучение их соотношения друг с другом и описание основных черт внутреннего строения). Следующий этап предусматривал исследование морфоструктуры территории, выделение ее литоморфной и неотектонической составляющей. На основе визуального дешифрирования космических снимков выделены линеаменты и кольцевые морфоструктуры. При дешифрировании в качестве дешифровочного признака применялся плановый рисунок гидро-

сети. Для кольцевых морфоструктур, используя зависимость их размеров от глубины расположения инициирующих очагов, составлена схематическая карта поверхности инициирующих очагов.

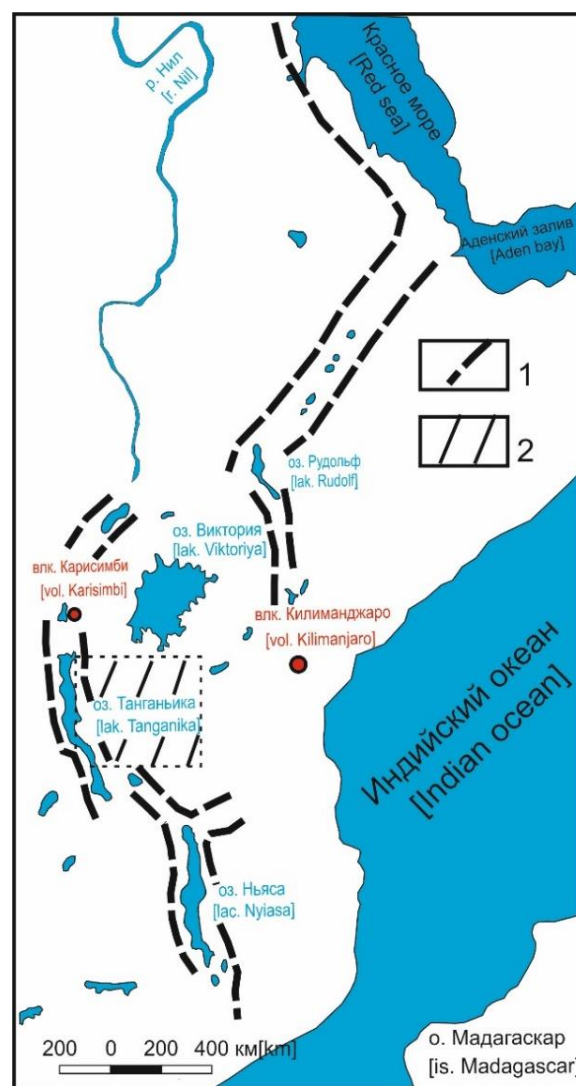


Рис. 1. Схема расположения района исследований: 1 – Наиболее крупные разломы ограничения рифтовых грабенов, 2 – район исследований.

[Fig. 1. Layout of the study area: (1) – The largest limiting rift grabens. (2) – Research area.]

На последнем этапе проведено сопоставление результатов морфоструктурного анализа с геологией фундамента.

Важнейшими задачами морфоструктурных исследований для данной территории является изучение разрывных нарушений, которые могут отражаться в поле линеаментов, а также кольцевых морфоструктур, по-видимому, тесно связанных с вулканическими процессами. Такая связь подтверждается близким расположением вулканических построек (вулканы Килиманджаро, Карисимби, Кения и др.). Интерес к разрывным нарушениям, равно как и к кольцевым структурам вызван тем, что к ним могут быть приурочены различные типы полезных ископаемых гидротермального ряда. Задача вычленения разломных структур из всей линеаментной сети, выделяемой на основе структурного дешифрирования материалов дистанционного зондирования Земли, а также установление связи результатов дешифрирования с данными геологической съемки весьма актуальна. Территория Республики Бурунди представляется благоприятной для решения названных задач, поскольку здесь сочетается сложная структура докембрийского основания с активными неотектоническими процессами, а также с наличием проявлений различных полезных ископаемых [2].

Методика исследований включала выделение кольцевых и линейных элементов морфоструктуры на основе дешифрирования космических снимков, анализ цифровой модели рельефа территории Республики Бурунди, а также сопоставление этих данных с результатами геологической съемки [3].

Структурное дешифрирование выполнено по космическим снимкам системы Landsat. При дешифрировании главным дешифровочным признаком был плановый рисунок гидросети, поскольку он отражает распределение приповерхностной трещиноватости [4]. Эта трещиноватость создает ослабленные зоны (зоны повышенной проницаемости пород), которые осваиваются эрозией в процессе ее формирования. Таким образом, подобные формы полностью соответствуют наименованию – «линейная и кольцевая морфоструктура», то есть, тектоническая структура (линейная и кольцевая полоса трещиноватости), выраженная в рельефе сочетанием речных долин. Если линейные морфоструктуры (линеаменты) традиционно сопоставляются с разломами, то интерпретация кольцевых образований, выраженных в рельефе, носит более сложный характер. Кроме структур экзогенного происхождения, среди них выделяются объекты вулканогенного, магматогенного, тектоногенного и др. генезиса. Конкретное происхождение этих форм может быть определено с использованием дополнительных данных, полученных с привлечением всей геологической информации по изучаемому району [5]. Вместе с тем, выделяется большая группа кольцевых форм, происхождение которых остается не выясненным. Они объединяются в категорию «крипоструктур». Существуют разработки, позволяющие по размеру кольцевых образований определить возможную глубину

инициирующего их формирование очага [6]. Эта глубина может быть определена по соотношению радиуса кольцевой морфоструктуры и угла скалывания горных пород. Углы скалывания для различных горных пород определены экспериментально М.В. Гзовским и составляют, например, для гранитов $10\text{--}20^\circ$, для песчаников – $15\text{--}30^\circ$, [7]. На величину угла скалывания влияет состояние вязкости горных пород (способности твердых тел противостоять пластической деформации). В приповерхностной части литосферы она составляет значительную величину – 10^{24} Па·с. Поэтому здесь развиваются хрупкие разрывы, формирующие линейные и кольцевые формы приповерхностной трещиноватости. По мере увеличения глубины нарастает литостатическое давление и температура. Вязкость пород постепенно понижается, и на уровне гранулит-базитового слоя (глубина около 20 км) при литостатическом давлении 3.5 Кбар и температуре 673К она составляет 10^{22} Па·с [8]. Соответственно изменяется угол скалывания пород. Для характеризуемой территории, в пределах которой широко распространены гранитоиды, принят угол скалывания соответствующий 20° .

Материалами, использованными при выполнении работы, являлись данные геологической съемки территории, космические снимки, цифровая модель рельефа, а также опубликованные материалы.

Обсуждение результатов

Краткая геологическая характеристика включает особенности рельефа территории, который сформирован в основном холмистым глыбовым плоскогорьем, которое ступенчато погружается с запада на восток. В этом же направлении выделяются несколько основных морфологических единиц рельефа: низменность Имбо, хребет Конго-Нил (с абсолютными отметками, достигающими 2670 м), Центральное плато, низменности Бурогома, Бурагане и Кумосо. Хребет Конго-Нил образован рядом хребтов, ориентированных в субмеридиональном направлении. К югу он постепенно снижается.

Центральное плато составляет большую часть территории. Его рельеф образован холмами различного размера. Низменности Бурогома, Бурагане и Кумосо с абсолютными отметками около полутора тысяч метров расположены на востоке страны на границе с Танзанией.

Геологический разрез территории Бурунди представлен в основном в различной степени метаморфизованными докембрийскими породами Кибарского складчатого пояса (рис. 2).

Рифтовые впадины заполнены новейшими (неоген-четвертичными) мощными толщами речных и озерных отложений, щелочными лавами и туфами. Земная кора в системе рифтов имеет сокращенную до 25 км мощность, отличается повышенным тепловым потоком и высокой сейсмичностью [1]. Характеристика докембрийских образований территории Республики Бурунди, основные проблемы в их изучении подробно приведены недавно в статье В. М. Ненахова с соавторами [2]. Докембрийские породы представ-

лены в основном протерозоем. Верхняя часть его разреза (*верхний протерозой*), общей мощностью около 2000 метров, образована множеством формаций с пестрым составом – сложным чередованием извест-

няков, доломитов кварцитов, сланцев с прослоями, обогащенными туфогенным материалом, с линзами конгломератов и базальтов. В целом, в разрезах преобладают известняки.

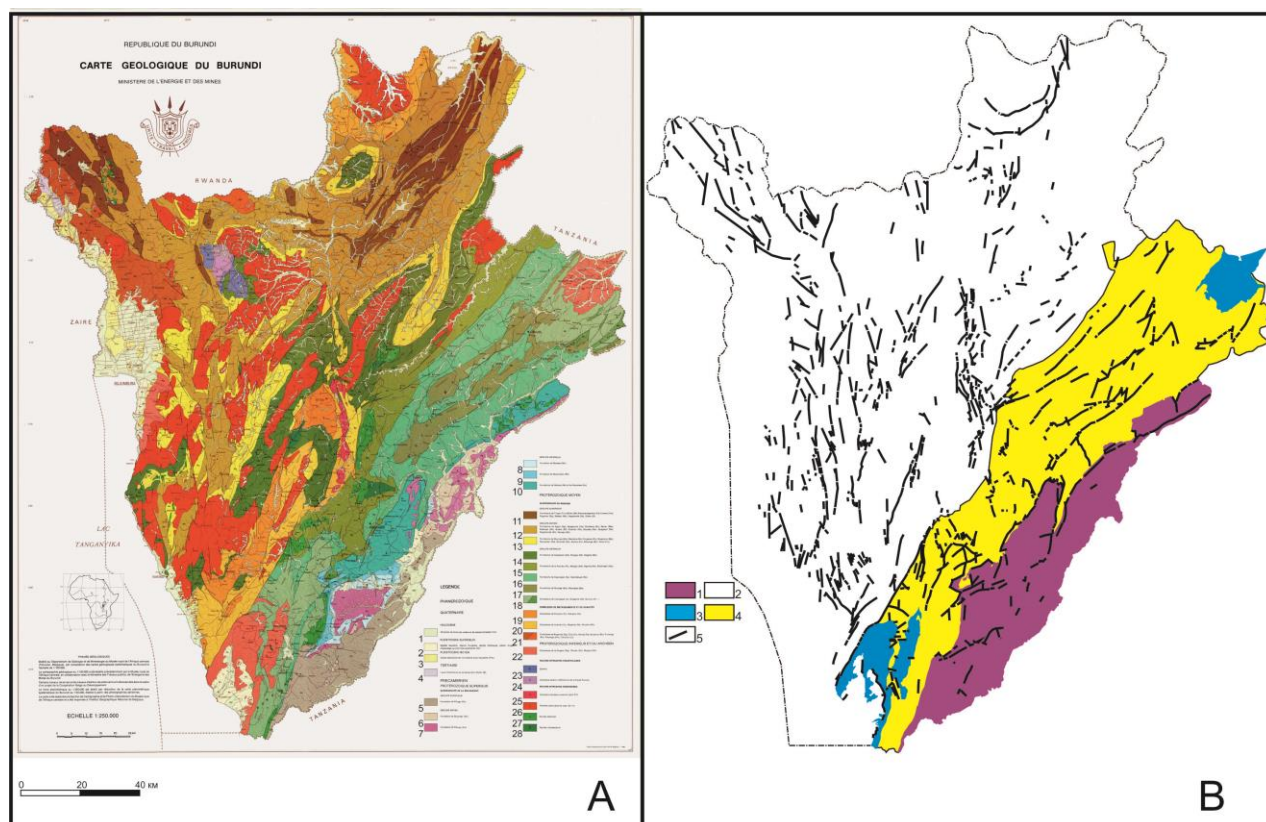


Рис. 2А. Геологическая карта Республики Бурунди [3]. Условные обозначения: **Фанерозой.** Квартер: 1 – голоцен (Ho), 2 – верхний плейстоцен (Ps), 3 – средний плейстоцен (Pm), 4 – третичный период (b). **Докембрий:** верхний протерозой, формации: 5 – Кибого (Kb), 6 – Бугонго (Bo), 7 – Кабуье (Ka), 8 – Мусаса (Mu), 9 – Муциндози (Mc), 10 – Нкома (Nk); средний протерозой, 11 – формации: Тонга (To), Микико (Mk), Камарамagamбо (Ka), Вумаси (Vm), Ругендо (Rg), Мабайи (Mb), Сагахандо (Sa), Гиша (Gi), 12 – формации: Нгози (Ng), Ньягисумо (Ny), Бутахана (Bu), Мурви (Mw), Масанго (Ms), Бутура (Bt), Рушуби (Rb), Муйебе (My), Ньягисози (Ns), Ньягиханда (Nh), Мураго (Mr), 13 – формации: Муйинга (My), Квокора (Mo), Руганза (Ru), Бугенюзи (Bu), Румандари (Ru), Гичумби (Gc), Каринци (Kr), Бухонга (Bh), Чене (Cn), 14 – формации: Ньябикере (By), Рукаго (Rd), Мугара (Ma), 15 – формации: Мусангати (Mu), Рувубо (Rv), Мигого (Mo), Нгома (No), 16 – формации: Кайонгози (Ky), Ньямобуе (No), 17 – формации: Муйага (My), Мпунгве (Mp), 18 – формации: Инанзерве (Iz), Мугатаре (Mr). **Метасадочные и гранитные комплексы.** 19 – комплексы: Кирьяма (Ki), Казигве (Ka), 20 – комплексы: Вьянда (Vy), Мигендо (Mi), Мурехе (Mh), 21 – комплексы: Буганда (Mg), Зина (Zn), Ранда (Rn), Бубанза (Bb), Руханга (Rn), Киманга (Km), Чохоча (Co), **нижний протерозой и/или архей.** 22 – комплексы: Мугере (Mg), Гикукка (Gk), Мугера (Ma). **Панафриканские интрузивные породы.** 23 – Сиенит, 24 – недифференцированный комплекс верхнего Рубубу. Кибарские интрузивные породы. 25 – граниты с щелочной тенденцией (тип Gr 4), 26 – известково-щелочные граниты (тип Gr 1–3), 27 – основные породы, 28 – ультраосновные породы.

[Fig. 2A. Geological map of the Republic Burundi. The legend. **Phanerozoic.** Quarter: (1) – Holocene (Ho), (2) – upper Pleistocene (Ps), (3) – middle Pleistocene (Pm), (4) – tertiary period (b). **Precambrian:** upper Proterozoic, formation: (5) – Kibago (Kb), (6) – Bugongo (Bo), (7) – Rabuye (Ka), (8) – Musasa (Mu), (9) – Mucindosi (Mc), (10) – Nkoma (Nk); middle Proterozoic, (11) – formation: Tonga (To), Mikiko (Mk), Kamaramagambo (ka), Vumasi (Vm), Rugendo (Rg), Mabayi (Mb), Sahando (Sa), Gisha (Gi), (12) – formation: Ngozi (Ng), Niygisumo (Ny), Butahana (Bu), Murwi (Mw), Masango (Ms), Butura (Bt), Rushubi (Rb), Muyebe (My), Nygisozo (Ns), Nygihanda (Nh), Murago (Mr), (13) – formation: Mueinga (My), Kvorora (Mo), Ruganza (Ru), Bugenzuzi (Bu), Rumandari (Ru), Gichumbi (Gc), Karinci (Kr), Buhonga (Bh), Chene (Cn), (14) – formation: Nybikere (By), Rukago (Rd), Mugara (Ma), (15) – formation: Musangati (Mu), Rubobo (Rv), Migogo (Mi), Ngoma (No), (16) – formation: Kayongozi (Ky), Nymobue (No), (17) – formation: Muiyaga (My), Mpungve (Mp), (18) – formation: Inanzerve (Iz), Mugatare (Mr). Metasetting and granite complexes: (19) – Riryama (Ki), (20) – complexes: Buganda (Mg), Zina (Zn), Randa (Rn), (21) – Bubanza (Bb), Ruhanga (Rn), Kimanga (Km), Chohoha (Co), lower Proterozoic and/or Archean. complexes: (22) – Mugere (Mg), Gikuka (Gk), Mugeru (Ma), Pan-African intrusive rocks. (23) – syenite, (24) – undifferentiated upper Rabu complex. Kibar intrusive rocks, (25) – granites with alkaline tendency (Type Gr 4), (26) – lime-alkaline granites (type Gr 1–3), (27) – base rocks, (28) – ultra-basic rocks.]

Рис. 2В. Структурная схема территории Республики Бурунди. Структурные этажи: 1 – верхнепротерозойский, 2 – среднепротерозойский, 3 – нерасчлененный нижнепротерозойский – архейский, 4 – шовная зона, 5 – разломы (с геологической карты Республики Бурунди).

[Fig. 2B. Structural diagram of the Republic of Burundi territory. The structural floors: (1) – upper Proterozoic, (2) – middle Proterozoic, (3) – undivided lower Proterozoic – Archean, (4) – suture zone, (5) – the faults (from the geological map of the Republic of Burundi).]

В средней части разреза отмечены лавовые покровы (формация Кабу́йе). В основании разреза верхнего протерозоя (формация Нкома) залегают брекчии и конгломераты, аркозы, сланцы с биотитом, андалузитом и турмалином.

Средний протерозой, с мощностью формаций около 2000 метров, в верхней части разреза (формация Тонга) образован кварцитами, которые переслаиваются с конгломератами, основными компонентами которых являются кварциты и, в меньшей степени, жильный кварц. В кварцитах местами отмечается косая слоистость, которая характеризует мелководно морские, прибрежные условия осадконакопления. В средней части разреза доминирует кварцит, переслаивающийся с метапелитами и алевролитами. Нижняя часть разреза, характеризующаяся формациями Нябикере, Рукаго, Магара, образована сланцами, филитовидными алевролитами, а также слюдистыми песчаниками. Для пород характерна повышенная мощность, изменяющаяся от 2000 метров (формация Мусонгати) до 3000 метров (Мигого, Рувубо, Нгома, которые, возможно, являются одновозрастными аналогами формации Мусонгати).

Нижний протерозой не отчленяется от архейских образований и представлен сильно метаморфизованными породами комплексов Мугере, Гикука и Мугера.

По распространению пород на территории Республики Бурунди выделяются несколько отчетливо выраженных областей. Они в значительной степени определяют рельеф территории, его литоморфную компоненту.

Верхняя часть разреза верхнего протерозоя (формация Кибого) распространена в виде прерывистой полосы вдоль границы с Танзанией. Породы остальной части верхнего протерозоя (до формации Нкома, включительно) распространены на юго-востоке страны. Рельеф в области развития верхнего протерозоя представлен чередованием узких понижений и холмов, вытянутых в северо-восточном направлении. Средний протерозой занимает основную часть территории Бурунди в области Центрального плато. Для области распространения пород среднего протерозоя характерен холмистый рельеф с преобладанием изометричных форм.

Породы Панафриканского интрузивного комплекса (граниты, сиениты) занимают наиболее возвышенные части страны, в пределах Конго-Нильского хребта. Особое место на фоне указанных крупных морфоструктурных подразделений занимают структурно-денудационные формы рельефа, представленные бронирующими слоями, выделяющимися в составе пород среднего протерозоя. Это устойчивые к процессам денудации слои кварцитов в формации Тонга. Они чередуются с пачками относительно мягких пород (формация Мусонгати). Бронирующие слои могут быть использованы в качестве маркирующих горизонтов при характеристике тектоники региона, параметров залегания пород в процессе геологического картирования территории.

В тектоническом отношении на характеризуемой территории в докембрии выделяются три структурных

этажа, которые отличаются внутренним строением и отделяются зонами разломов. *Верхний структурный этаж* сопоставляется с верхним протерозоем (рис. 2В). Его подошва проходит по зоне надвигов в общем северо-западном направлении. В разрезе она выражена мощной толщей тектонитов, представленных брекчиями, конгломератами в глинистом матриксе (формации Нкома, Кавитве).

Средний структурный этаж соответствует породам среднего протерозоя. В его составе широко распространены гранитоиды, которые сочетаются с брахиформными складками с различной ориентировкой осей. Средний структурный этаж отделен от верхнего шовной зоной шириной 40-50 километров. Эта зона образована протяженными линейными складками нескольких порядков. Оси складок, как первого, так и более высоких порядков устойчиво ориентированы в северо-восточном направлении, параллельно надвиговой границе. Это позволяет предположить, что ее северо-западная граница представлена надвигом в общем юго-восточном направлении. Впрочем, может быть предложена и иная модель формирования структуры шовной зоны. Эта модель подразумевает развитие рифтогенной структуры, испытавшей инверсию, латеральное сжатие и складкообразование на заключительных этапах своего развития.

Нижний структурный этаж выходит в ядрах складок шовной зоны. Его внутренняя структура проявлена недостаточно четко. Можно лишь отметить, что породы нижнего протерозоя – архея местами смяты в складки второго порядка, совместно со складками, развитыми в шовной зоне.

Разломы, показанные на геологической карте Республики Бурунди (см. рис. 2В), можно разделить на несколько систем. Первая из них имеет северо-восточное простирание и распространена преимущественно в шовной зоне, а также вдоль границы верхнего структурного этажа. Вторая система, ориентированная преимущественно в меридиональном направлении, проходит полосой вдоль берега озера Танганьика и имеет, по-видимому, неотектоническую природу. В качестве неотектонической структуры может быть представлен и хребт Конго-Нил.

Разломы северо-западного направления распространены по площади в меньшей степени.

Материалы, использованные для структурного дешифрирования, представлены космическими снимками (рис. 3А), а также цифровой моделью рельефа (рис. 3В). На космических снимках главным дешифровочным признаком служил плановый рисунок эрозионной сети, включающий как речные, так овражные и балочные долины. При выделении кольцевых морфоструктур использованы как кольцевые, так и дугообразные изображения.

Использование цифровой модели рельефа (ЦМР), благодаря контрастному изображению высоты, позволило на основе сопоставления с геологической картой выделить литоморфную (структурно-денудационную) составляющую морфоструктуры.

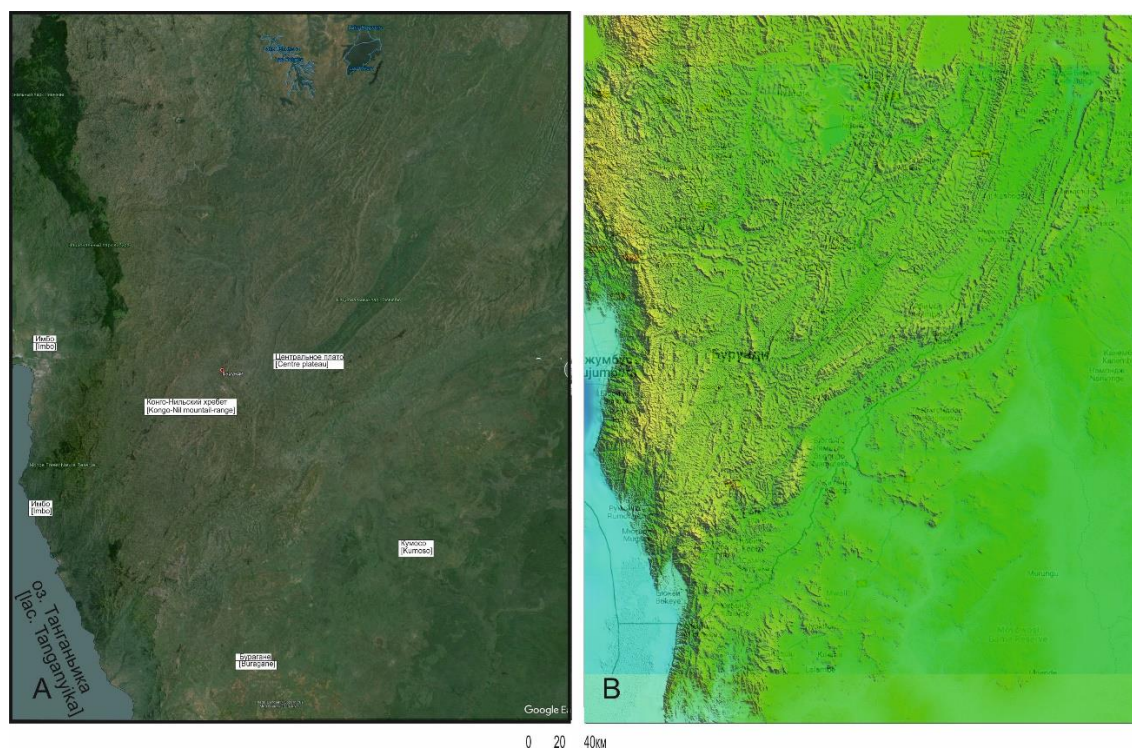


Рис. 3. (А) – Космические снимки территории Республики Бурунди (Landsat Copernicus. Map Data 2023), (В) Цифровая модель рельефа (3 D) территории Республики Бурунди.

[Fig. 3. (A) – Satellite images of the territory of the Republic of Burundi (Landsat Copernicus. Map Data 2023), (B) – Digital elevation model (3D) of the Republic of Burundi.]

В результате структурного дешифрирования космических снимков установлены линейные и кольцевые морфоструктуры (рис. 4). Среди линейных морфоструктур (линеаментов) выделены локальные и региональные линеаменты. Принимается, что локальные линеаменты вероятно отражают разнонаправленную приповерхностную трещиноватость, созданную в процессе регматогенеза, а также неотектонических движений, влияющих на формирование рельефа земной поверхности. Региональные линеаменты проявляются через сгущение однонаправленных локальных линеаментов. Они прослеживаются через всю территорию изучаемой площади или в пределах ее значительной части. Среди их направлений преобладают северо-западное и северо-восточное. При сопоставлении с литоморфными морфоструктурами, выделенными на цифровой модели рельефа, часть из региональных линеаментов северо-восточного простираения совмещаются с этими морфоструктурами. Они могут рассматриваться как отражение древних элементов структуры, сформированных в протерозое. Местами они позволяют выявить складчатый характер залегания пород.

Среди *кольцевых морфоструктур* наибольшим распространением пользуются морфоструктуры с радиусами менее 1 км. Выделяются еще два преобладающих значения радиусов кольцевых образований - около 5 км и 14 км. Кольцевые морфоструктуры на площади характеризуемой территории распределены неравномерно. Наиболее ярко выраженные сгущения характерны для мелких форм. Они приурочены, как прави-

ло, к относительно пониженным участкам (с абсолютными отметками менее 775 м) вдоль береговой зоны Имбо озера Танганьика, а также в районах с повышенной мощностью неогеновых и четвертичных образований вдоль долин крупных рек. Следуя представлениям [5] с учетом того, что прибрежная зона сложена песчано-глинистыми отложениями неогена и квартера, инициирующий их очаг должен располагаться на глубине около 1 км и менее.

Наибольший интерес представляют морфоструктуры с радиусами 14 км, для которых глубина очага составляет около 30 км и соответствует возможному гипсометрическому положению подошвы коры. Эта группа морфоструктур использована для составления схемы положения инициирующих очагов (рис. 5).

Глубина поверхности расположения инициирующих очагов, расположенных в интервале от 20 до 25 км охватывает территорию вблизи береговой зоны озера Танганьика. Эти значения приближены к значениям, которые получены геофизическими методами для мощности коры в пределах зоны рифтовых структур – около 25 км [1]. В южном направлении, а также на севере территории глубина постепенно увеличивается до значений, превышающих 38 км. Можно предположить, что подобным образом ведет себя мощность коры. Другая группа кольцевых морфоструктур с радиусами около 5 км характеризуется глубинами инициирующих очагов примерно 15 км, что может соответствовать гипсометрическому положению границы Конрада (подошвы гранито-гнейсового слоя земной коры).

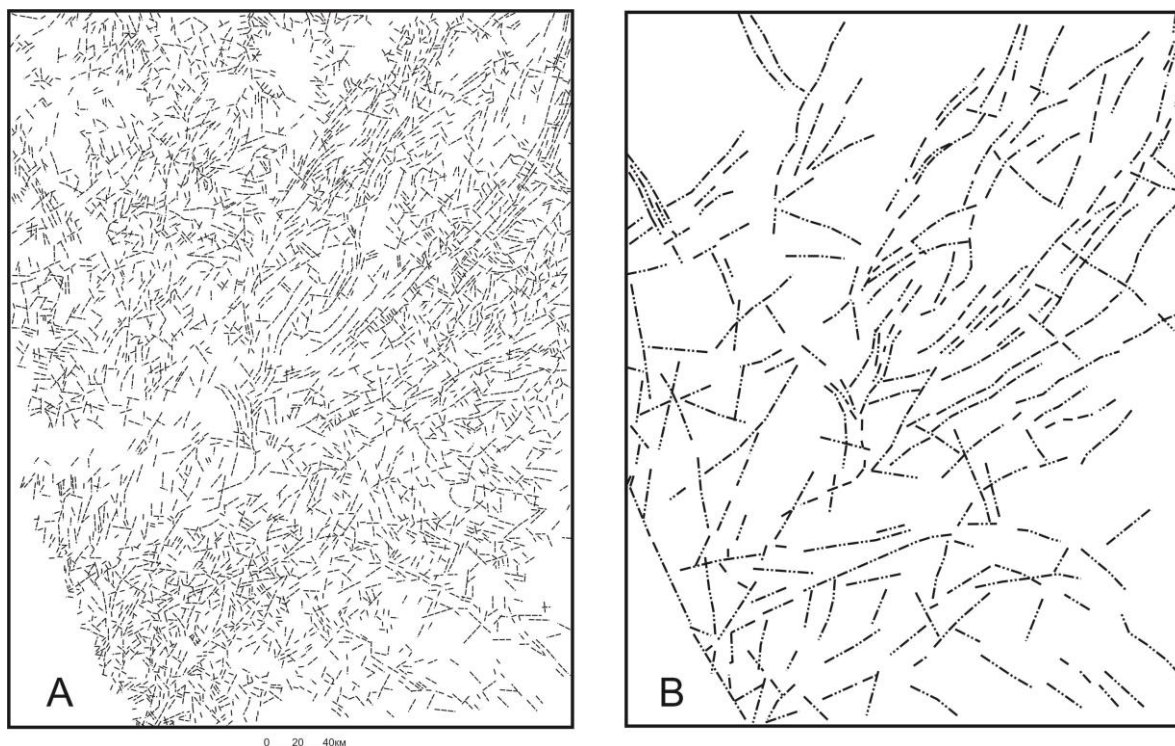


Рис. 4. Локальные линейменты (А), региональные линейменты (В) по результатам структурного дешифрирования космических снимков.

[Fig. 4. The local lineaments (A), the regional lineaments (B) based on the results of interpretation of space images.]

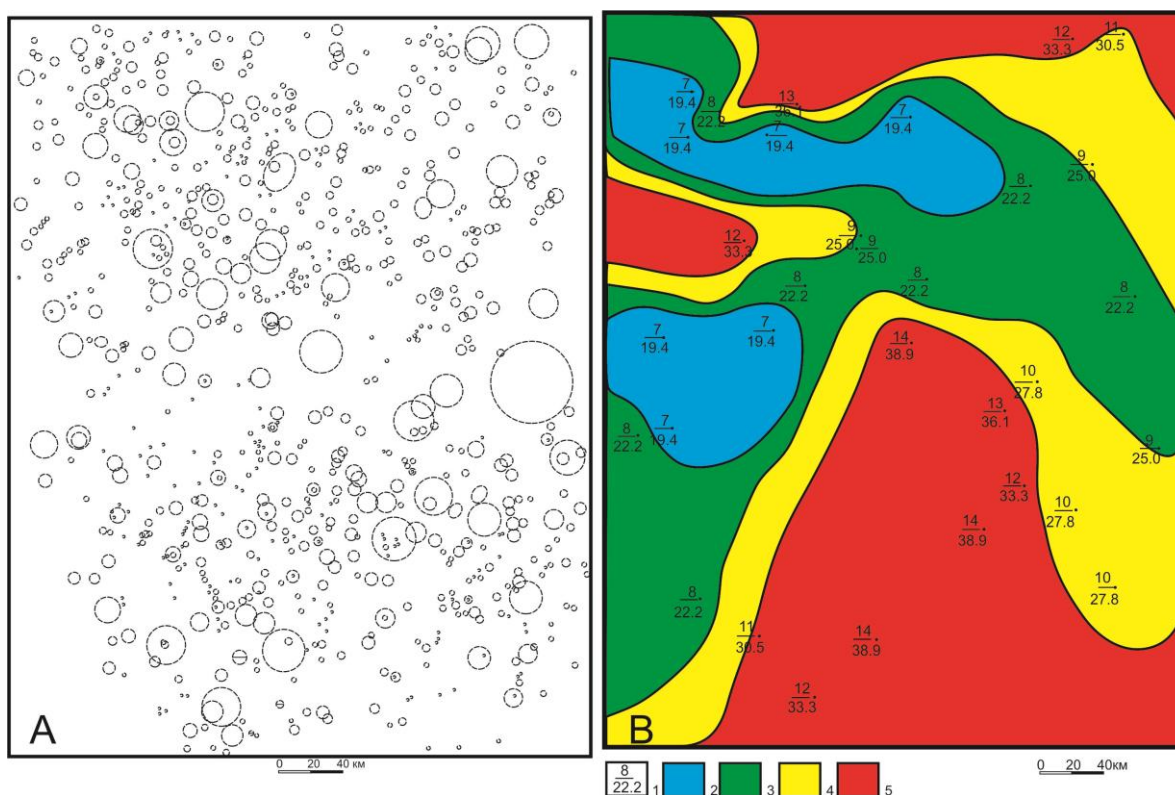


Рис. 5. Схема результатов дешифрирования кольцевых морфоструктур (А) и глубины инициирующих их очагов (В). 1 – центры кольцевых морфоструктур (в числителе – радиус кольца, в знаменателе – глубина очага). Области глубин инициирующих очагов (км): 2 – 20 и менее, 3 – от 20–25, 4 – 25–30, 5 – 30–38 и более.

[Fig. 5. Diagram of decoding of ring morphostructures (A) and depth of their initiating foci (B). (1) – centres of ring morphostructures (in the numerator – radius of the ring, in the denominator – depth of the focus). Depth regions of initiating foci (km): (2) – 20 and less, (3) – 20–25, (4) – 25–30, (5) – 30–38 and more.]

Сравнивая данные по глубине расположения очагов, инициирующих образование кольцевых морфоструктур со схемой региональных линейментов можно отметить, что многие из них отмечают высокоградиентные зоны, простирающие которых соответствует ориентировке линеймента. Можно высказать предположение о соответствии таких региональных линейментов вязким разломам, которые имеют глубинный (по крайней мере – коровый) характер. Формирование этих региональных линейментов, как зон сгущения однонаправленных локальных линейментов, позволяет сделать вывод о неотектоническом происхождении вязких разломов.

Неотектонический элемент морфоструктуры на характеризующей территории развит в большей степени, чем литоморфный. Среди наиболее крупных новейших морфоструктур выделяется фрагмент рифтовой впадины вдоль восточного борта оз. Танганьика, часть плеча рифта, представленная Конго-Нильским хребтом, а также активизированная часть древней Африканской платформы, соответствующая Центральному Плато и прилегающим к нему низменным участкам Кумосо, Буйгома. Перечисленные элементы неотектонической структуры в значительной степени выражены в глубине залегания поверхности очагов, инициирующих формирование кольцевых морфоструктур. Минимальные глубины (менее 20 км) приурочены к рифтовой впадине и плечу рифта [9]. Выделяющаяся полоса малых глубин, отходящая в восточном направлении, возможно, связана с ответвлением рифта и фиксируется озерами Руверо и Кохоха (на северо-востоке страны). Максимальные значения глубины (приближенные к 35–40 км) сопоставляются с полосой, которая прослеживается в меридиональном направлении, имеет ширину до 150 км и проходит почти через всю страну. На юге территории, как и на ее севере, область повышенных глубин (25–30 км) ориентирована в широтном направлении и может быть сопоставлена с фрагментами древней платформы, которые не нарушены неотектоническими процессами. Приведенные данные не противоречат результатам геофизических исследований Восточно-Африканской рифтовой системы. Мощность земной коры в пределах, собственно, рифтовых структур определяется в интервале 18–20 км. В восточном направлении она постепенно возрастает до 30–35 и более километров [10].

Заключение

Таким образом, проведенное изучение морфоструктуры территории Республики Бурунди позволяет сделать следующие выводы.

В особенностях морфоструктуры проявляются как литоморфная составляющая, так и неотектоническая. В литоморфной составляющей отчетливо проявляется

структура протерозоя. Неотектонические элементы сформированы благодаря высокой активности рифтовых структур.

Поле линейментов, выделяемое при дешифрировании космических снимков, отражает разрывные нарушения фундамента лишь фрагментарно и связано, по-видимому, с разрывами неотектонического этапа развития территории.

Важное место в морфоструктуре занимают кольцевые морфоструктуры. В них глубина инициирующих очагов может соответствовать глубине расположения гипоцентров землетрясений и, возможно, положению подошвы земной коры в регионе. Этот вывод заслуживает особого внимания с методических позиций, но требует дополнительных исследований с использованием данных по более обширной территории.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казьмин В. Г. Рифтовые структуры Восточной Африки – раскол континента и зарождение океанов. М.: Наука, 1987. 203 с.
2. Ненахов В. М., Нтихаририза С., Ниндорера Ж. К., Барихута Б. Основные черты строения и проблемы геологии Бурунди (Центральная Африка) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2024. № 1. С. 31–36.
3. Carte Geologique du Burundi. Echelle 1: 250.000. Institut Geographique National de Belgique, 1990.
4. Трегуб А. И., Трегуб С. А., Клепикова Н. Е. Линейментный анализ при изучении глубинного строения платформенных территорий (на примере центральной части Воронежской антеклизы). *Динамическая геология – проблемы и достижения*: сб. ст. всероссийской конференции. М.: ООО "Издательство "Перо", 2023. С. 278–290.
5. Использование материалов космических съемок при региональных геологических исследованиях (методические рекомендации). Отв. ред. В. Н. Брюханов. М.: Мингео СССР, 1986. 160 с.
6. Соловьев В. В., Рыжкова В. М. Карта рельефа подошвы литосферы России. Масштаб 1:10 000 000. Объяснительная записка. Геологический атлас России. Раздел 2. Геологическое строение и геофизическая характеристика недр. М.: СПб., 1996. С. 185–194.
7. Гзовский М. В. Основы тектонофизики. М.: Недра, 1975. 536 с.
8. Добрецов Н. Л., Кирдяшкин А. Г., Кирдяшкин А. А. Глубинная геодинамика. 2 изд. доп. и перераб. Новосибирск: ГЕО, 2001. 409 с.
9. Лобковский Л. И. Никишин А. М., Хаин В. Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный Мир, 2004. 612 с.
10. Восточно-Африканская рифтовая система: в 3-х т. Отв. ред. В. В. Белоусов. Том 3. Геохимия, сейсмология, основные результаты. М.: Наука, 1974. 288 с.

Morphostructure of the territory of the Republic of Burundi

©2024 A. I. Tregub[✉], J. K. Nidorera, B. Barihuta

Voronezh State University, 1 Universitetskaya pl., 394018, Voronezh, Russian Federation

Abstract

Introduction: the scientific problem in studying the morphostructure of the territory of the Republic of Burundi is to clarify its relationship with the tectonic structure of the foundation. The purpose of the article is to highlight the main elements of the morphostructure and evaluate their role in reflecting the structure of the foundation.

Methodology: the study site is located within the western branch of the East African Rift System, east of Lake Tanganyika. The sequence of the study included a description of the main subdivisions of the territory's relief, an analysis of the geological structure of the Precambrian foundation (section and lithology of rocks, as well as the identification of structural levels, the study of their relationship with each other and a description of the main features of the internal structure). The next stage involved studying the morphostructure of the territory, identifying its lithomorphic and neotectonic components. Based on visual interpretation of satellite images, lineaments and ring morphostructures were identified. During decryption, a planned drawing of the hydraulic network was used as a decryption feature. For ring morphostructures, using the dependence of their sizes on the depth of location of the initiating foci, a schematic map of the surface of the initiating foci was compiled. At the last stage, the results of morphostructural analysis were compared with the geology of the basement. The materials used in the work were geological survey data of the territory, satellite images, a digital elevation model, as well as published materials.

Results and discussion: as a result of the research, the relief of the territory was characterized, which includes (from west to east): the low-lying area of Imbo along the eastern shore of lake Tanganyika, the Congo-Nile ridge, the Central Plateau, a strip of relatively low areas on the border with Tanzania - Buragan, Kumoso, Buyogama. An analysis of the geological structure of the territory of the Republic of Burundi was carried out. The section of rocks composing the Precambrian basement includes formations of the Upper, Middle and Lower Proterozoic – Archean. Of great importance are the quartzite layers, which play the role of armor horizons. The western and northwestern parts of the territory are saturated with granitoids, which determine the hilly nature of the relief. Tectonically, based on the presence of unconformities, the territory can be divided into three structural levels, differing in their internal structure. In the morphostructure of the territory, two types are distinguished: lithomorphic and neotectonic. Lithomorphic elements are clearly recognizable on the digital elevation model. When interpreting satellite images, some of the identified regional lineaments coincide with the marking layers. The neotectonic component of the morphostructure is formed by the eastern side of the lake rift Tanganyika. The Congo-Nile ridge represents a fragment of a shoulder of a rift structure. The Central Plateau and adjacent low areas are fragments of the African Plate.

Conclusion: as a result of the research, the following conclusions can be drawn: the features of the morphostructure exhibit both lithomorphic and neotectonic components. The lithomorphic component clearly shows the structure of the Proterozoic. The field of lineaments reflects faults in the basement only in fragments and is apparently associated with neotectonic ruptures. An important place in the morphostructure is occupied by ring elements. The depth of the sources that initiate them may correspond to the depth of the



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Alexander I. Tregub, e-mail: tregub@yandex.ru

earthquake hypocenters and, possibly, to the position of the base of the earth's crust. This conclusion deserves special attention from a methodological point of view and requires additional research.

Keywords: Republic of Burundi, morphostructure, lineaments, new tectonics.

For citation: Tregub A. I., Nidorera J. K., Barihuda B. Morphostructure of the territory of the Republic of Burundi // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2024, no. 3, pp. 4–13. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/3/4-13>

Conflict of interests: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Kazmin V. G. *Riftovye struktury Vostochnoy Afriki – raskol kontinenta I zarozhdenie okeanov* [Rift structures of East Africa – the split of the continent and the birth of the oceans]. Moscow, Nauka publ., 1987, 203 p. (In Russ.)
2. Nenahov V. M., Ntiharirizva S., Nidorera J. K., Barihuda B. Osnovnye cherty stroeniya i problemy geologii Burundi (Zentralnaya Afrika) [Main structural features and problems of geology of Burundi (Central Africa)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2024, no. 1, pp. 31–36 (In Russ.)
3. Carte Geologique du Burundi. Echelle 1: 250.000. Institut Geographique National de Belgique, 1990
4. Tregub A. I., Tregub C. A., Klepikova N. E. Lineamentny analiz pri izuchenii glubinnogo strjeniya platformennyh territory (na primere centralnoy chasti Voronezhskoy anteklizy) [Lineament analysis when studying the deep structure of platform territories (on the example of the central part of the Voronezh antecline)] *Dinamicheskaya geologiya – problemy i dostizheniya: sb. st. vserossijskoj konferencii* [Dynamic geology – problems and achievements: coll. Art. All-Russian conference]. Moscow, Publishing House "Pero" publ., 2023, pp. 278–290 (In Russ.)
5. *Ispol'zovanie materialov kosmicheskikh s'emok pri regional'nyh geologicheskikh issledovaniyakh (metodicheskie rekomendacii)* [Use of Space Survey Materials in Regional Geological Studies (Recommended Practice)]. Ed. V. N. Bryukhanov. Moscow, Mingeo SSSR publ., 1986, 160 p. (In Russ.)
6. Solov'ev V. V., Ryzhkova V. M. *Karta rel'efa podoshvy litosfery Rossii. Mashtab 1:10 000 000. Ob'yasnitelnaya zapiska. Geologicheskii atlas Rossii. Razdel 2. Geologicheskoe stroenie i geofizicheskaya harakteristika nedr* [Relief map of the bottom of the lithosphere of Russia. Scale 1: 10 000 000. Explanatory note. Geological Atlas of Russia. Section 2. Geological structure and geophysical characteristics of the subsurface]. Moscow–Saint Petersburg publ., 1996, pp. 185–194 (In Russ.)
7. Gzovsky M. V. *Osnovy tektofiziki* [Fundamentals of tectonophysics]. Moscow, Nedra publ., 1975, 536 p. (In Russ.)
8. Dobrecov N. L., Kirdyashkin A. G., Kirdyashkin A. A. *Glubinnaya geodinamika*. 2 izd. Gop. i pererab [Deep geodynamics. 2 ed. add. and revision]. Novosibirsk, GEO publ., 2001, 409 p. (In Russ.)
9. Lobkovsky L. I., Nikishin A. M., Hain V. E. *Sovremennye problemy geotektoniki i geodinamiki* [Modern problems of geotectonics and geodynamics]. Moscow, Nauchny Mir publ., 2004, 612 p. (In Russ.)
10. *Vostochno-Afrikanskaya riftovaya Sistema: v 3 t.* Ed. V. V. Belousov. vol. 3. *Geohimiya, seismologiya, osnovnie rezultati*. [East African rift system. Geochemistry, seismology, main results]. Moscow, Nauka» publ., 1974, 288 p. (In Russ.)

Трегуб Александр Иванович, д.г.-м.н., профессор, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: tregubai@yandex.ru; ORCID 0000-0002-8653-1165

Ниндорера Жан Клод, аспирант Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: miclaude79@gmail.com; ORCID 0009-0004-7674-1937

Бальтазар Барихута, аспирант, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация, e-mail: barihuthaza@gmail.com; ORCID 0009-0005-7733-1136

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Alexandr I. Tregub, PhD in Geol.-Min., Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: tregubai@yandex.ru; ORCID 0000-0002-8653-1165

Jean Claude Nidorera, Postgraduate student, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: miclaude79@gmail.com; ORCID 0009-0004-7674-1937

Barihuta Balthazar, Postgraduate student, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: barihuthaza@gmail.com; ORCID 0009-0005-7733-1136

Authors have read and approved the final manuscript.