

УДК 550.93

DOI: 10.24930/2500-302X-2025-25-3-373-397

## Петрографические особенности и реконструкция источников сноса нижнерифейских песчаников мукунской серии юго-востока Анабарского щита

Г. О. Карпинчик<sup>1,2</sup>, А. Д. Савельев<sup>1,2</sup>, Е. Е. Середа<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, 199106, г. Санкт-Петербург, Средний проспект, 74, e-mail: gkarpincik@gmail.com

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

Поступила в редакцию 17.06.2024 г., принята к печати 12.08.2024 г.

**Объект исследования.** Нижнерифейские терригенные породы мукунской серии Восточно-Анабарского бассейна. **Цель.** Реконструкция источников сноса, выявление петрографических особенностей и восстановление обстановок осадконакопления этих терригенных пород. **Материалы и методы.** Исследовалась верхняя часть разреза мукунской серии, расположенная в нижнем течении реки Большая Куонамка (юго-восток Анабарского щита), а также группа образцов нижнерифейских песчаников того же уровня. Восстановление источников сноса и обстановок формирования терригенных пород основано на U-Pb датировании обломочных цирконов, а также полевых наблюдениях и изучении минерального состава этих пород с помощью петрографического, рентгенофазового и рентгеноспектрального анализов. **Результаты.** Изученные песчаники характеризуются бимодальным гранулометрическим составом (песок-алеврит), преобладанием угловатых зерен калиевого полевого шпата с интенсивно проявленными вторичными изменениями, а также средне и хорошо окатанными зернами кварца и циркона. U-Pb датирование обломочного циркона (69 зерен) показало наличие нескольких разновозрастных источников сноса, представленных магматическими и метаморфическими породами, возраст которых соответствует основным пикам спектра распределения датировок:  $1965 \pm 5$ ,  $2095 \pm 14$ ,  $2750 \pm 7$  и  $2891 \pm 9$  млн лет (средневзвешенная оценка). **Выводы.** Накопление нижнерифейских терригенных пород мукунской серии Восточно-Анабарского бассейна происходило в мелководной, спокойной обстановке в процессе размыва устойчивого континентального блока местного происхождения. Наиболее представительным (более 50%) является возрастной кластер обломочного циркона ~1965 млн лет, который отражает широкое распространение на Анабарском щите пород протерозойского регионального гранулитового метаморфизма. Помимо метаморфизованных архей-протерозойских пород источником циркона могут являться следующие магматические комплексы: архейский анабарский эндербит-чарнокит-мигматитовый и протерозойские маганский аляскит-лейкогранит-мигматитовый вместе с билляхским гранодиорит-гранит-граносиенитовым. Отсутствие в изученном песчанике обломочного циркона моложе 1890 млн лет свидетельствует о разных питающих провинциях для Западно- и Восточно-Анабарского бассейнов осадконакопления.

**Ключевые слова:** мукунская серия, лабазтахская свита, нижний рифей, Анабарский щит, источники сноса, обломочные цирконы, геохронология, рентгенофазовый анализ

## Petrographic features and provenance reconstruction of the Lower Riphean sandstones of the Mukun Group of the south-eastern Anabar shield

Gleb O. Karpinchik<sup>1,2</sup>, Aleksandr D. Savelyev<sup>1,2</sup>, Elena E. Sereda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, 74, Sredny av., St. Petersburg 199106, Russia, e-mail: gkarpincik@gmail.com

<sup>2</sup>St. Petersburg State University, 7/9 University emb., St. Petersburg 199034, Russia

Received 17.06.2024, accepted 12.08.2024

**Research subject.** Lower Riphean terrigenous rocks of the Mukun Group of the East Anabar basin. **Aim.** Reconstruction of provenance, identification of petrographic features, and restoration of sedimentation environments of these terrigenous

**Для цитирования:** Карпинчик Г.О., Савельев А.Д., Середа Е.Е. (2025) Петрографические особенности и реконструкция источников сноса нижнерифейских песчаников мукунской серии юго-востока Анабарского щита. *Литосфера*, 25(3), 373-397. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-373-397>. EDN: DJMCOG

**For citation:** Karpinchik G.O., Savelyev A.D., Sereda E.E. (2025) Petrographic features and provenance reconstruction of the Lower Riphean sandstones of the Mukun Group of the south-eastern Anabar shield. *Lithosphere (Russia)*, 25(3), 373-397. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-373-397>. EDN: DJMCOG

© Г.О. Карпинчик, А.Д. Савельев, Е.Е. Середа, 2025

rocks. *Materials and methods.* The upper part of the Mukun Group section located in the lower reaches of the Bolshaya Kuonamka River (southeast of the Anabar Shield) was studied, as well as a set of Lower Riphean sandstone samples of the same level. Reconstruction of provenance and formation environments of terrigenous rocks was based on U-Pb dating of detrital zircons, as well as field observations and study of the mineral composition of these rocks using petrographic, X-ray phase and X-ray spectral analyses. *Results.* The studied sandstones are characterized by a bimodal granulometric composition (sand-siltstone), dominated by angular grains of potassium feldspar with intense secondary alterations, as well as medium and well-rounded grains of quartz and zircon. The U-Pb dating of detrital zircon (69 grains) showed the presence of several different-aged provenances, represented by igneous and metamorphic rocks, the age of which corresponds to the main peaks of the dating distribution spectrum:  $1965 \pm 5$ ,  $2095 \pm 14$ ,  $2750 \pm 7$ , and  $2891 \pm 9$  Ma (weighted average). *Conclusions.* The deposition of Lower Riphean terrigenous rocks of the Mukun Group of the East Anabar Basin occurred in a shallow, calm environment during the erosion of a stable continental block of local origin. The most representative (more than 50%) is the age cluster of detrital zircon  $\sim 1965$  Ma, which reflects the widespread occurrence of Proterozoic regional granulite metamorphism rocks on the Anabar Shield. In addition to metamorphosed Archean-Proterozoic rocks, the following igneous complexes might have been the source of zircon: Archean Anabar enderbite-charnockite-migmatite and Proterozoic Magan alaskite-leucogranite-migmatite together with Billyakh granodiorite-granite-granosyenite. The absence of detrital zircon younger than 1890 Ma in the studied sandstone indicates different provinces for the West and East Anabar sedimentation basins.

**Keywords:** Mukun Group, Labzakh Formation, Lower Riphean, Anabar shield, provenance, detrital zircons, geochronology, X-ray phase analysis

#### Acknowledgements

We are grateful to A.K. Khudoley for recommendations on the composition and design of the scientific article as well as to B.V. Belyatsky, N.V. Platonova, K.Yu. Vasilyeva, and O.Yu. Lebedeva for their assistance with geochronological, X-ray phase, and petrographic analysis. The authors express their gratitude to S.P. Nilov and M.V. Nikitina for the opportunity to process stone material using the facilities of the Scientific Park of St. Petersburg State University and to two anonymous reviewers for their valuable comments on the work.

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение рифейских отложений Анабарского щита началось с геологических съёмок 1950–1970 г., в результате которых были получены основные сведения, затрагивающие строение чехла (Савицкий и др., 1959; Лопатин, Табунов, 1969). Предположения об источниках сноса мукунских песчаников базируются на широко распространенных представлениях о небольших поднятиях в пределах Анабарского щита, образование которых обусловлено коллизией террейнов в раннем протерозое. Большая часть работ по изучению отложений мукунской серии была сосредоточена на западном склоне Анабарского щита (Савицкий и др., 1959; Злобин, Кабаньков, 1970; Шпунт и др., 1982; Петров, 2011; Горохов и др., 2019; см. также ссылки в этой работе), где разрезы имеют большую мощность и поделены на несколько свит.

В то же время имеются лишь отрывочные данные по возрасту, петрографическому и химическому составу песчаников мукунской серии в восточной части Анабарского щита: геохимические и изотопно-геохронологические исследования, осу-

ществленные с помощью современных методов, редки (Купцова и др., 2015; Khudoley et al., 2015; Raquette et al., 2017). Поскольку на юго-восточном склоне Анабарского щита в составе мукунской серии по проведенным в настоящее время геологическим работам выделяется только лабзакская свита (Государственная..., 2016), целью данной работы стало определение возможных источников сноса и выявление петрографических характеристик именно лабзакских песчаников.

### Геологическое строение Анабарского щита и его обрамления

Анабарский щит образует выход фундамента Сибирской платформы, и в его пределах обнажаются породы трех террейнов: Маганского, Далдынского и Биректинского, последний из которых скрыт под Хапчанским поясом (Розен и др., 2000; Гусев, 2013; Купцова и др., 2015). Центральная часть Анабарского щита сложена глубокометаморфизованными архейскими и нижнепротерозойскими породами, которые по периферии перекрыты рифей-палеозойским осадочным чехлом (Розен

и др., 2000). При этом породы чехла с восточного склона отличаются по своим мощностям (Савицкий и др., 1959; Комар, 1966; Государственная..., 2016), составу и структурно-текстурным особенностям (Купцова и др., 2015) по сравнению с породами западного склона Анабарского щита. Кроме того, восточный блок характеризуется сильной латеральной изменчивостью составляющих его стратиграфических подразделений (Петров, 2011). Перечисленные признаки указывают на существование в палеопротерозое двух отдельных бассейнов седиментации – Западно-Анабарского и Восточно-Анабарского, взаимоотношения между которыми остаются неясными.

В настоящее время в составе мукунской серии Западно-Анабарского бассейна последовательно снизу-вверх по разрезу выделяются следующие свиты: ильинская, бурдурская и лабазтахская (рис. 1) (Шпунт и др., 1982; Петров, 2011; Государственная..., 2016; Горохов и др., 2019). На восточном фланге прослеживается лишь лабазтахская свита (Савицкий и др., 1959; Комар, 1966; Государственная..., 2016), которая и является объектом исследования.

Отложения ильинской свиты начинают базальную часть разреза мукунской серии и залегают с угловым несогласием на породах фундамента. Мощность свиты варьирует в пределах 225–240 м, а в ее составе прослеживаются песчаники, кварцевые красно-бурые гравелиты, линзы конгломератов (Государственная..., 2016) и также прокварцованные пирокластические породы: туфы и туфобрекчии (Шпунт и др., 1982).

На северо-западе обнажаются породы вышележащей бурдурской свиты. Мощность свиты составляет 275–485 м. Свита сложена кварцевыми песчаниками розовых оттенков и линзами алевролитов и гравелитов с галькой (Государственная..., 2016). Отложения лабазтахской свиты венчают разрез мукунской серии.

Лабазтахская свита – наиболее распространенная часть серии, обнажающаяся на северо-западном, восточном и юго-восточном склонах Анабарского поднятия (Государственная..., 2016). Мощность свиты варьирует от 0 до 240 м, а в ее разрезах присутствуют кварцевые гравелиты оранжевого и красно-бурого цветов с прослоями конгломератов нижней пачки, образующие, вероятно, нижнюю подсветку и сменяющиеся вверх по разрезу более однородными среднезернистыми песчаниками и кварцито-песчаниками верхней подсветки, которая перекрывается доломитами и строматолитовыми постройками билляхской серии (Лопатин, Табунов, 1969; Шпунт и др., 1982; Государственная..., 2016). Лабазтахская свита не выдержана по мощности – если на западе Анабарского щита это стратиграфически полные разрезы, то на востоке мощности заметно сокращаются, и сами разрезы уже

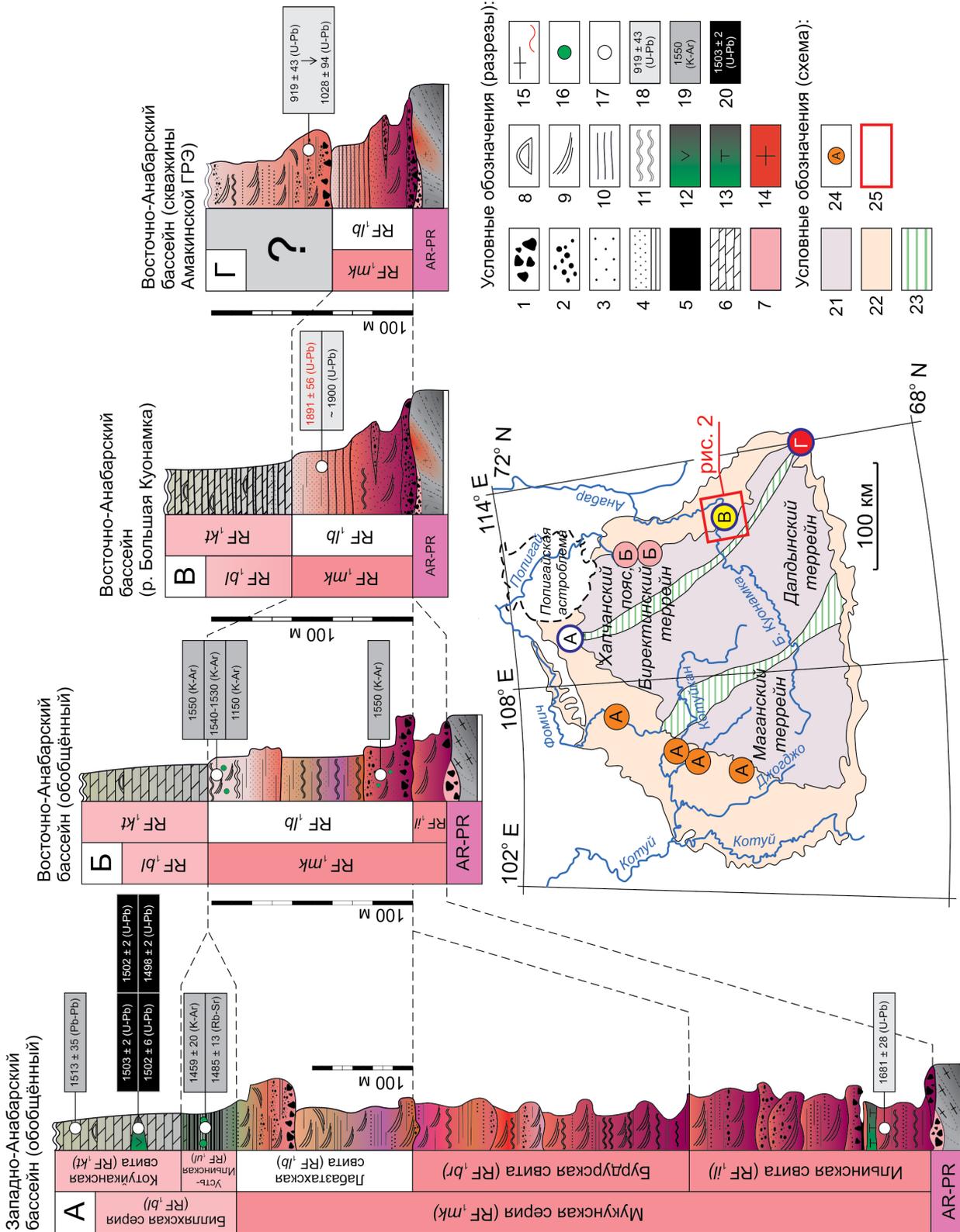
характеризуются стратиграфической неполнотой (Савицкий и др., 1959; Комар, 1966; Шпунт и др., 1982).

Накопление мукунской серии началось не ранее 1680 млн лет назад, а закончилось до 1500 млн лет назад, на что указывает U-Pb возраст обломочного циркона из низов разреза и возраст даек и силлов, прорывающих доломиты вышележащей билляхской серии (Веселовский и др., 2009; Khudoley et al., 2015; Ernst et al., 2016; Pasenko et al., 2023). Согласно (Петров, 2011) накопление мукунской серии началось около 1580 млн лет назад, после длительного континентального перерыва, продолжавшегося более 50 млн лет.

### **Исследования мукунской серии**

При сопоставлении разрезов западного и восточного склонов Анабарского щита четко прослеживается резкое сокращение мощностей и стратиграфического объема мукунской серии именно в его юго-восточной части (см. рис. 1). Это совместно со слабой обнаженностью востока Анабарского щита стало причиной недостатка данных по составу и генезису отложений мукунской серии в пределах Восточно-Анабарского бассейна.

Первые общие сведения о мукунских отложениях востока Анабарского щита и схемы сопоставления этих пород с западной частью Анабара были получены В.И. Савицким и др. (1959). В дальнейшем выделением отдельных пачек среди нижнерифейских пород мукунской серии и их послыным литологическим описанием занимались С.Ф. Духанин, Э.М. Эрлих (1967), Б.Г. Лопатин, С.М. Табунов (1969), Б.Р. Шпунт и др. (1982). Вышеупомянутые исследователи описали мукунскую серию в пределах западного склона Анабарского щита как вулканогенно-обломочную, выделив в ней не только терригенные, но и эффузивные и пирокластические породы. В это же время, на территории восточного склона среди нижнерифейских отложений мукунской серии были описаны только терригенные породы (Духанин, Эрлих, 1967; Лопатин, Табунов, 1969; Шпунт и др., 1982). Можно предположить, что в раннемукунское время к северу от Анабарского щита произошло магматическое событие с возрастом примерно 1720 млн лет (Khudoley et al., 2015). Сформированные в результате данного события магматические комплексы к северу от Анабарского щита одновременно выступили и источником циркона в терригенных отложениях ильинской свиты (см. рис. 1, Купцова и др., 2015). Туфы мукунской серии на западе Анабарского щита могут быть следствием небольших всплесков магматизма, который предшествовал образованию Куонамской изверженной провинции 1.5 млрд лет назад (Ernst et al., 2000; Ernst et al., 2016; Pasenko et al., 2023). Тем не менее, стоит отметить, что описан-



1 – конгломераты, 2 – гравелиты, 3 – песчаники, 4 – алевролиты, 5 – аргиллиты, 6 – доломиты, 7 – коры выветривания, 8 – строматолитовые постройки, 9 – косая слоистость, 10 – горизонтальная слоистость, 11 – знаки ряби, 12 – долериты, 13 – туфы, 14 – граниты, 15 – гнейсы/гранито-гнейсы, 16 – глауконит 17 – изотопные пробы, 18 – возрасты наиболее молодого обломочного циркона (красным – данная статья), 19 – возрасты осадочных пород по глауконитам, 20 – возрасты даек по бадделиту, 21 – AR-PR кристаллические породы фундамента, 22 – RF осадочные отложения, 23 – меланжевые (шовные) зоны, 24 – разрезы мукунской и бильяхской серий: оранжевый по (Петров, 2011), розовый по (Духанин, Эрлих, 1967; Лопатин, 1972; Константиновский, 2000), жёлтый – данная статья, красный по (Купцова и др., 2015), синий контур по (Khudoley et al., 2015), 25 – участок полевых работ. Указанные на рисунке датировки (млн лет): 1485±13 и 1459±20 млн лет – Rb-Sr и K-Ar возрасты глауконита усть-ильинской свиты (Горохов и др., 1991; Зайцева и др., 2016); ~1900, 1681±28, 1891±56 млн лет – U-Pb возраст самого молодого обломочного циркона песчаников мукунской серии (Khudoley et al., 2015) и данная статья; 919±43 млн лет и 1028±94 – U-Pb возраст самого молодого обломочного циркона рифейских песчаников (Купцова и др., 2011 и Купцова и др., 2015 соответственно); 1513±35 млн лет – Pb-Pb изохрона бильяхских доломитов (Горохов и др., 2019); 1503±2, 1502±2, 1502±2 млн лет – U-Pb возраст бадделитов из долеритовых силлов, рвущих доломиты бильяхской серии (Ernst et al., 2016; Pasenko et al., 2023). Вариации цветов в колонке соответствуют цветам пород.

**Fig. 1.** Insert of the Anabar Shield according to (Ernst et al., 2016 with additions by the authors) with the study area marked and the structure of the section of the lower part of the Precambrian sedimentary cover according to the following data (Komar, 1966; Dukhanin, Erlikh, 1967; Lopatin, Tabunov, 1969; Lopatin, 1972; Shpunt et al., 1982; Konstantinovsky, 2000; Kuptsova et al., 2011; Petrov, 2011; Kuptsova et al., 2015; State..., 2016; Gorokhov et al., 2019 and references therein).

1 – conglomerates, 2 – gravelites, 3 – sandstones, 4 – siltstones, 5 – mudstones, 6 – dolomites, 7 – weathering crusts, 8 – stromatolite buildups, 9 – cross bedding, 10 – horizontal bedding, 11 – ripple marks, 12 – dolerites, 13 – tuffs, 14 – granites, 15 – gneisses/granite-gneisses, 16 – glauconite, 17 – isotope samples, 18 – ages of the youngest detrital zircon (this article is in red), 19 – ages of sedimentary rocks based on glauconites, 20 – ages of dikes based on baddeleyite, 21 – AR-PR crystalline basement rocks, 22 – RF sedimentary deposits, 23 – mélange (suture) zones, 24 – sections of the Mukun and Bilyakh series: orange according to (Petrov, 2011), pink according to (Dukhanin, Erlikh, 1967; Lopatin, 1972; Konstantinovsky, 2000), yellow – this article, red according to (Kuptsova et al., 2015), blue contour according to (Khudoley et al., 2015), 25 – area of field study. The datings (in million years) shown in the figure are: 1485±13 and 1459±20 Ma are the Rb-Sr and K-Ar ages of glauconite from the Ust-Ilya Formation (Gorokhov et al., 1991; Zaitseva et al., 2016); ~1900, 1681±28, 1891±56 Ma are the U-Pb age of the youngest detrital zircon from the Mukun Group sandstones (Khudoley et al., 2015) and this article; 919±43 Ma and 1028±94 are the U-Pb age of the youngest detrital zircon from the Riphean sandstones (Kuptsova et al., 2011 and Kuptsova et al., 2015 respectively); 1513±35 Ma – Pb-Pb isochron of the Bilyakh dolomites (Gorokhov et al., 2019); 1503±2, 1502±2, 1502±2 Ma – U-Pb age of baddeleyites from dolerite sills cutting the Bilyakh series dolomites (Ernst et al., 2016; Pasenko et al., 2023). The color variations in the column correspond to the colors of the rocks.

ные Б.Р. Шпунтом эффузивные породы встречены только в стратотипическом разрезе ильинской свиты и не имеют широкого распространения (Шпунт и др., 1982; Государственная..., 2015).

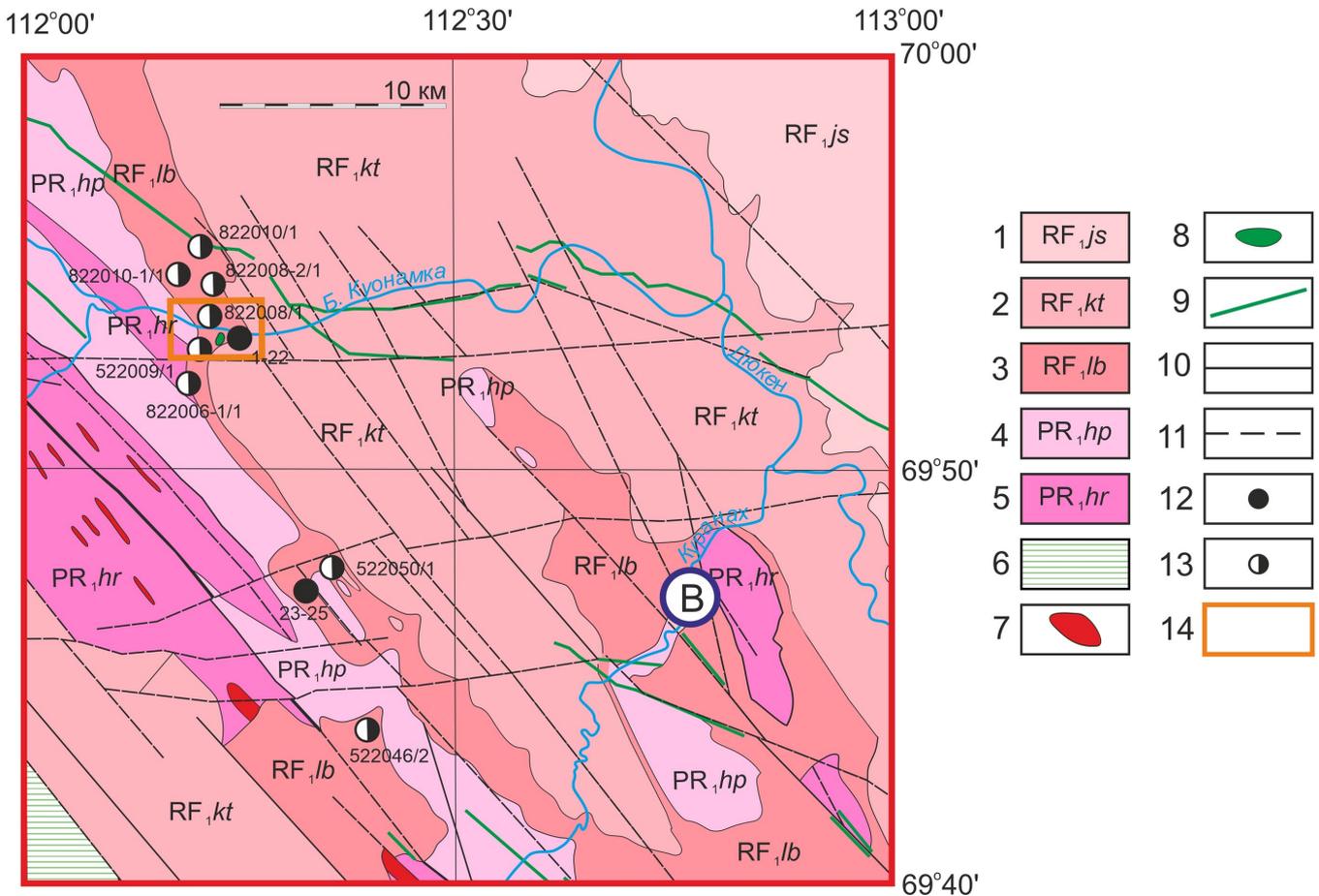
Обстановками образования пород мукунской серии Западно-Анабарского бассейна активно занимался П.Ю. Петров, который на основе полевых и петрографических описаний выделил аллювиальную, эолово-флювиальную и флювиально-себховую ассоциации фаций (Петров, 2011). В пределах же Восточно-Анабарского бассейна современные палеорекострукции мукунских терригенных образований основываются в основном на результатах построений диаграмм распределения возрастов обломочных цирконов (Купцова и др., 2015; Khudoley et al., 2015; Paquette et al., 2017). Несмотря на проведенные предшественниками изотопно-геохронологические и петрографические исследования (Купцова, 2012; Купцова и др., 2015; Khudoley et al., 2015; Paquette et al., 2017), ощущается нехватка данных для установления комплексов пород, поставлявших обломочный материал для формирования нижнерифейских песчаников Восточно-Анабарского бассейна.

#### ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Район исследований располагается на юго-востоке Анабарского щита, в бассейне рек Большая Куонамка и Куранах. По 22 прозрачно-полированным шлифам (ППШ) были исследованы песчаники, отобранные из коренных выходов верхней части разреза мукунской серии в русле р. Б. Куонамка. Длина профиля пробоотбора вдоль реки Б. Куонамка составила примерно 130 м, начиная от кровли лабазтахской свиты и продолжаясь вниз по разрезу. GPS-координаты начала профиля: 69°53'13"N 112°15'09"E, конца: 69°53'12"N 112°15'21"E (рис. 2).

Коренные обнажения лабазтахской свиты вдоль р. Б. Куонамка представляют собой плитчатые выходы терригенных пород (рис. 3а) с широко распространенными симметричными знаками ряби волнения и трещинами усыхания (рис. 3б, 3в).

Песчаники характеризуются плохой сортировкой и преобладанием частиц тонкой и мелкой размерности (рис. 4). Среди обломочной фракции, прежде всего, выделяются кварц (15–98%), калиевый полевой шпат (КПШ) (0–80%) и обломки пород (не более 15%). При этом все зерна КПШ либо тонкого песчаного размера (0.05–0.1 мм), либо алевроитового (до 0.005 мм), в то время как размер зерен кварца изменяется в более широких пределах. Мелкие-средние зерна кварца часто имеют среднюю и хорошую окатанность по сравнению с угловатыми либо плохо окатанными полевыми шпатами. Относительно высокая степень окатанности обломков кварца указывает на их более дальний перенос или длительный перемыв. В целом минералогиче-



**Рис. 2.** Карта-схема с геологическим строением участка работ на основе (Государственная..., 1965) и дополненная по данным из (Gusev et al., 2021) и наблюдениям авторов.

1 – юсмастахская свита, 2 – котуйканская свита, 3 – лабзатахская свита, 4–5 – PR метаморфиты: 4 – хапчанской серии, 5 – хардахской серии, 6 – меланжевые (шовные) зоны, 7 – линзы и жилы аляскитов и пегматитов, 8–9 – интрузивные тела (8) и дайки (9) долеритов и габбро-долеритов, 10–11 – разломы достоверные (10) и предполагаемые (11), 12–13 – места отбора проб из коренных (12) и элювиальных (13) выходов для литологических исследований (данная статья), 14 – врезка для рис. 6.

**Fig. 2.** A schematic map with the geological structure of the work site based on (State..., 1965) and supplemented by data from (Gusev et al., 2021) and observations of the authors.

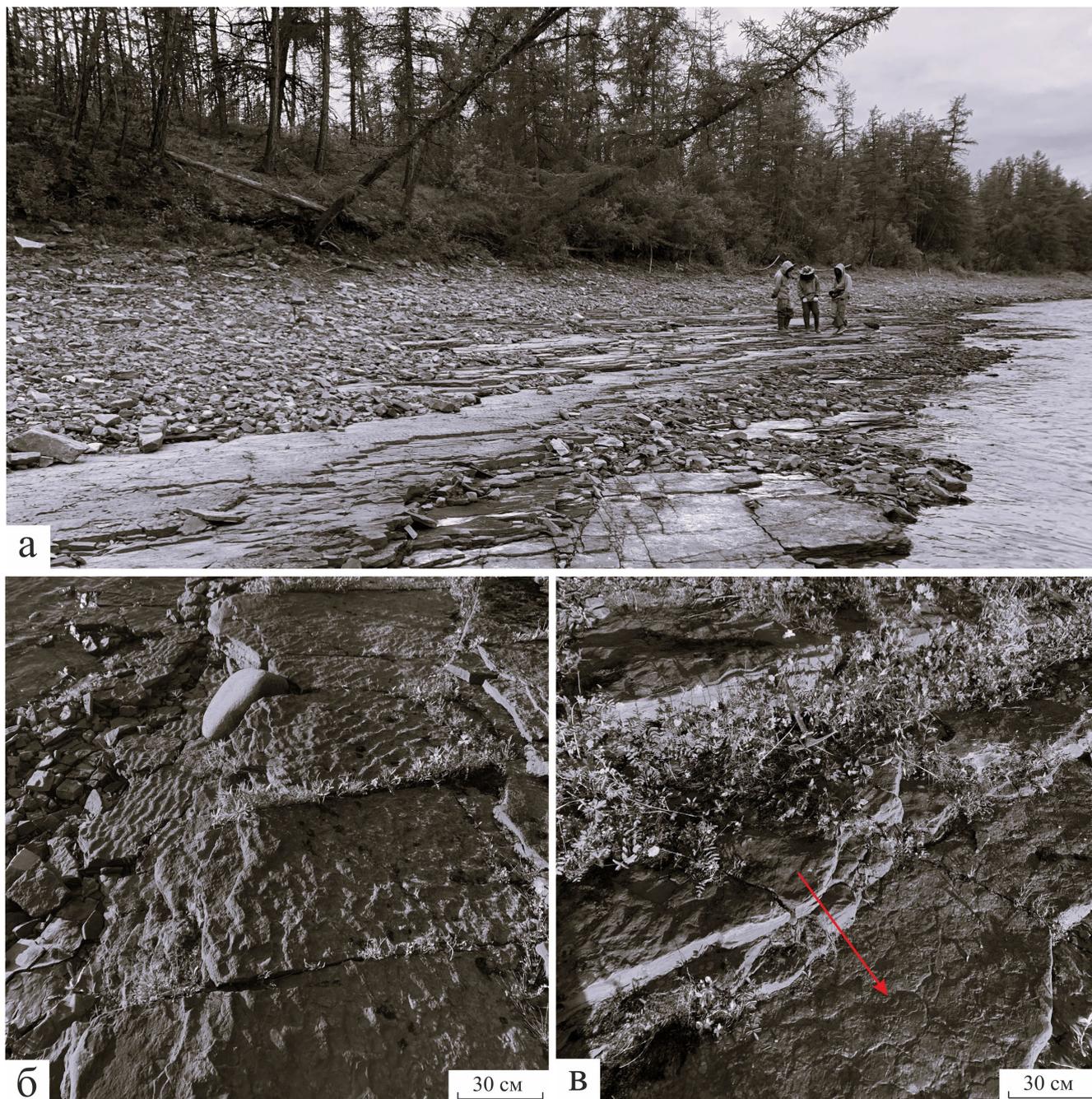
1 – Yusmastakh Formation, 2 – Kotuikan Formation, 3 – Labaztakh Formation, 4–5 – PR metamorphites of: 4 – Khapchan Group, 5 – Khardakh Group, 6 – mélange (suture) zones, 7 – lenses and veins of alaskites and pegmatites, 8–9 – intrusive bodies (8) and dikes (9) of dolerites and gabbro-dolerites, 10–11 – reliable (10) and inferred (11) faults, 12–13 – locations of sampling from primary (12) and eluvial (13) outcrops for lithological studies (this article), 14 – inset for fig. 6.

ская зрелость терригенных пород вверх по разрезу возрастает.

Кварц характеризуется белыми-серыми цветами интерференции и облачным либо волнистым погасанием. В образцах из элювиальных выходов с реки Б. Куонмака и р. Куранах (см. рис. 2) отмечается широкое развитие кварцевых регенерационных кайм вокруг обломочных зерен.

Сильно разложенные калиевые полевые шпайы могут утрачивать свои первоначальные контуры и практически полностью замещаются сплошной

массой оксидов железа, проявляющейся в виде бурого налета. Железистые минералы развиваются, возможно, по небольшим кавернам (Ulmer-Scholle et al., 2014), которые являются результатом выветривания. Однако встречаются и зерна, не подверженные разложению. Они характеризуются четко проявленной микроклиновой решеткой с затухающими двойниками. Для КПШ также характерен регенерационный цемент, состоящий из того же вещества, что и сами зерна, а также цемент замещения, представленный продуктами пелитизации.



**Рис. 3.** Общий вид коренных выходов нижнерифейских песчаников лабазтахской свиты юго-востока Анабарского щита (а) и экзоглифы кровли: б – знаки ряби, в – трещины усыхания.

**Fig. 3.** General view of bedrock outcrops of the Lower Riphean sandstones of the Labaztakh Formation of the south-eastern Anabar shield (a) and exoglyphs of the top: б – ripple marks, в – drying cracks.

Среди обломков пород распространены кварциты и микрокварциты, представленные поликристаллическим кварцем.

Цемент в песчаниках из коренных выходов в русле р. Б. Куонамка в основном доломитовый. Его

количество варьирует от 1 до 50%; распределен он неравномерно – в одной части шлифов открытый поровый, в другой – закрытый поровый, участками прерывистый контурный и всегда коррозионный. При этом карбонаты могут содержаться не

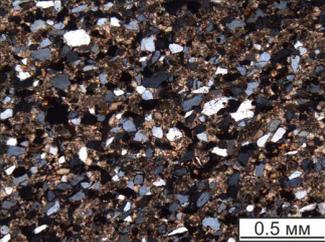
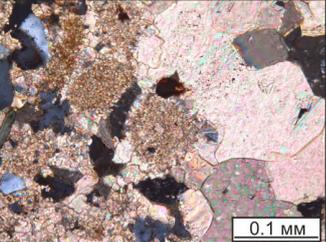
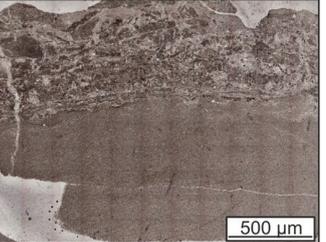
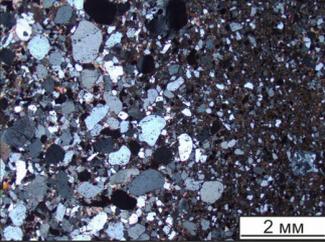
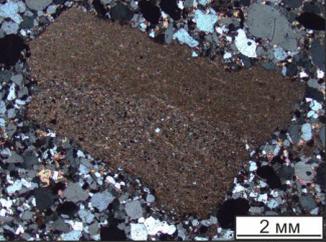
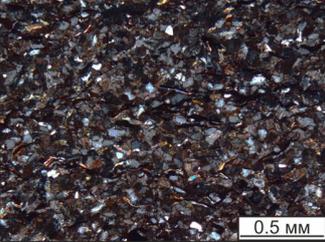
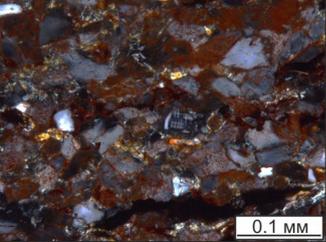
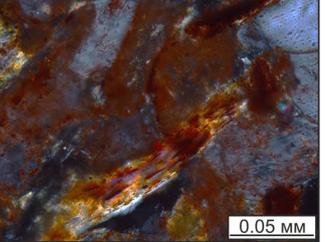
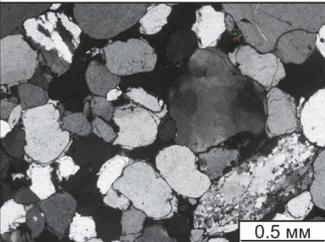
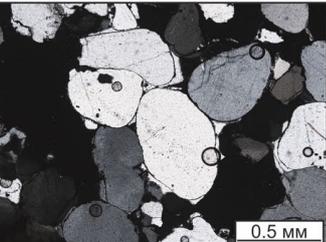
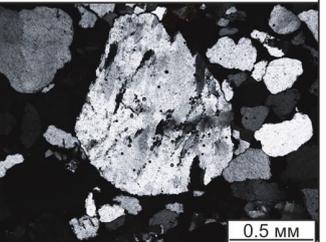
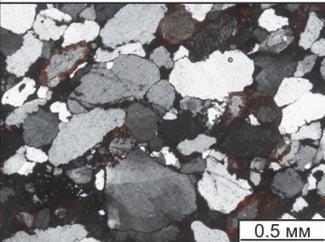
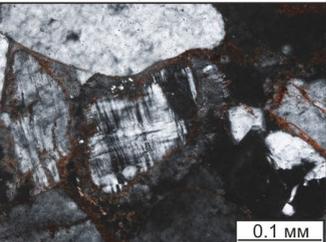
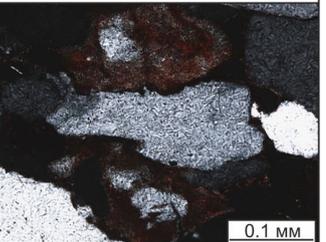
Образцы из коренных выходов		Микрофотографии шлифов (с анализатором)		
Положение в разрезе	Породы			
Верхняя часть изученного разреза	Аркозовые алевролиты и карбонатные породы			
		общий вид породы	взаимоотношения карбонатов разной генерации	строматолитовый? доломит (без анализатора)
Средняя часть изученного разреза	Алевритовые мелко-тонкозернистые аркозы с карбонатным цементом			
		общий вид породы	литокласт карбонатной породы	детритовый циркон с зональным строением
Нижняя часть изученного разреза	Полевошпатовые алевролиты			
		общий вид породы	сильно разложившиеся калиевые полевые шпаты	образование пластинок гематита по спайности слюд
Образцы из элювиальных выходов		Микрофотографии шлифов (с анализатором)		
	Породы			
Кварцевый песчаник мелко-среднезернистый с регенерационным кварцевым цементом				
		общий вид породы	регенерационный кварцевый цемент	поликристаллический кварц
Кварцевый песчаник тонко-мелкозернистый				
		общий вид породы	пленочный гематитовый и регенерационный полевошпатовый цементы	цемент замещения, представленный продуктами разложения полевых шпатов

Рис. 4. Микрофотографии шлифов пород лабзатхской свиты юго-востока Анабарского щита.

Fig. 4. Micrographs of thin sections of rocks of the Labaztakh Formation of the south-eastern Anabar shield.

только в цементе, но и в виде литокластов, однако их количество незначительно (<1%). Кроме того, в шлифах наблюдается как первичный микрокристаллический доломит, так и вторичный метасоматический с различной степенью кристалличности (от мелкокристаллической до мозаичной) и идиоморфными гранями. Из акцессорных минералов отмечаются магнетит, единичные зерна апатита, рутила, турмалина и циркона.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для комплексного изучения минерального состава песчаников лабазтахской свиты был применен ряд методов: рентгеноспектральный (РСА), рентгенофазовый (здесь и далее РФА) и петрографический анализы. Для определения питающих провинций этих пород использовались геохимический и изотопно-геохронологический анализы.

Для проведения РФА и выяснения характера изменений минерального состава песчаников сверху вниз по изученному профилю было отобрано 22 образца из коренных выходов с р. Б. Куонамка (см. рис. 2). В дальнейшем каменный материал дробился и измельчался в лаборатории пробоподготовки Института Наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ). Качественный и количественный РФА валовых проб, результаты которого представлены в табл. 1, проводился в РЦ «Рентгенодифракционные методы исследования» Научного парка СПбГУ при помощи автоматического порошкового дифрактометра Bruker «D2 Phaser». Так РФА позволил разделить полевые шпаты на калиевые и натриево-кальциевые, а также дать первичную характеристику процентного содержания породообразующих минералов обломочной фракции – кварца и полевых шпатов, что использовалось для классификации песчаников. Для уточнения полученных сведений и выяснения формы нахождения минералов в породах использовался петрографический анализ, который позволил установить, что кварцевый цемент в данных образцах характерен только для кварцевых песчаников, и потому для классификации таких пород принимались результаты РФА без дополнительных пересчетов точек в шлифах. Сведения о процентном содержании породообразующих минералов обломочной фракции, полученные в ходе РФА, для песчаников с карбонатным цементом показали довольно хорошую корреляцию с результатами петрографического анализа. Стоит отметить, что при петрографическом изучении шлифов песчаников наблюдались обломки кварцитов и микрокварцитов в виде поликристаллического кварца, однако в классификациях по (Петтиджон и др., 1976) и (Dickinson, 1985) такие обломки учитываются как конкретный минерал – кварц.

Тем не менее, при проведении РФА существует проблема наложения пиков, например, КПШ с рутилом. В изученных пробах количество тяжелой фракции, содержащий в том числе и рутил, не составляло более 1% от общей массы образца, и потому значения содержаний КПШ принимались за истинные.

Для изучения петрографических особенностей песчаников и определения соотношений породообразующих минералов было сделано 35 шлифов (из них 22 прозрачно-полированных). Определение акцессорных минералов проводилось в РЦ «Микроскопии и микроанализа» научного парка СПбГУ с помощью РСА на приборе Hitachi 3400N. Определение содержаний малых элементов (табл. 2) проводилось методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой ICP-MS в Центральной лаборатории Института Карпинского в Санкт-Петербурге.

Важная информация по возрастам пород в источнике сноса происходит из U-Pb датирования обломочных цирконов. Нами была отобрана проба из коренного выхода на р. Дюсун, из акватории р. Б. Куонамка (№ 23–25 на рис. 2). Циркон был выделен из предварительно измельченной фракции образца размером менее 0.5 мм в тяжелых жидкостях и магнитном сепараторе с ручной доочисткой под бинокулярной лупой. Локальное уран-свинцовое датирование выполнялось по стандартной методике (Rodionov et al., 2012) на вторично-ионном микрозонде SHRIMP-Пс в Центре Изотопных Исследований Института Карпинского (Санкт-Петербург). Датировались как ядра, так и внешние оболочки единичных зерен. Полученные результаты представлены в табл. 3, где уран-свинцовые отношения единичного измерения и рассчитанного возраста приведены с погрешностью на уровне  $\pm 1\sigma$ . Статистическая обработка результатов анализов и построение диаграмм с конкордий производилось с использованием программы IsoplotR (Vermeesch, 2018). Так как возраст изученного обломочного циркона, рассчитанный по отношению  $^{206}\text{Pb}$ – $^{238}\text{U}$ , превышал 1000 млн лет, то согласно (Gehrels, 2012) для статистических и графических построений (функция KDE) использовался возраст единичных зерен, рассчитанный по отношению  $^{207}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}$ . Учитывались только зерна с дискордантностью (D) менее 10%.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Рентгеноспектральный микроанализ и рентгенофазовый анализ

Для определения акцессорных минералов в изучаемых образцах использовался метод РСА совместно с петрографическим анализом. Было подтверждено наличие следующих минералов в тяжелой фракции песчаников р. Б. Куонамка: апатит, ти-

**Таблица 1.** Количественный фазовый состав валовых образцов (мас. %) по данным полнопрофильного анализа (метод Ритвельда)**Table 1.** Quantitative phase composition of bulk samples (wt %) according to full-profile analysis (Rietveld method)

№	<i>Qz</i>	<i>Kfs</i>	<i>Dol</i>	<i>Chl</i>	<i>Mca</i>	<i>Mag</i>	<i>Ant</i>	<i>Py</i>	<i>Cal</i>	<i>Hem</i>	$R_p^*$ , %
Образцы с р. Б. Куонамка											
1	60.8	26.1	12.4		следы						8.3
2	52.9	26.4	20.7								5.8
3	38.6	24.7	33.4		2.4			следы			6.5
4	26.8	17.8	53.1		2.1			следы			6.6
5	59.4	9.7	30.8					следы			6.7
6	59.3	20.1	20.1				следы	следы			7.4
7	44.8	23.1	32.1				следы	следы			4.8
8	63.8	19.8	16.4					следы			5.7
9	49.6	31.8	17		1.6			следы			5.9
10	70.2	19.6	10.1					следы			5.1
11	90.3	6.3	2.6				следы	следы			6.7
12	31.2	19.8	48.9					следы			4.9
13	61.3	17.6	21					следы			6.4
14	70.1	21.1	8.1	следы		следы	следы	следы	следы		5.6
15	74.9	16.2	8.8						следы		5.9
16	43.0	37	20								5.1
17	47.3	50.1	2.6					следы			4.2
18	55.9	40.2	3.2			следы	следы	следы			6.5
19	37.8	41.6	20.4				следы	следы			6.2
20	28.4	69.1	1.3			следы		следы			3.8
21	14.4	79.2				следы		следы		6.3	3.1
22	26.2	68.4		1.3	1.4					2.7	5.5
Образцы с р. Дюсун											
23	97.8	2.2									5.7
24	95.8	4.2									6.3
25	97.5	2.5									6.3

Примечание. *Qz* – кварц, *Kfs* – калиевый полевой шпат, *Dol* – доломит, *Chl* – хлорит, *Mca* – слюда, *Mag* – магнетит, *Ant* – анатаз, *Py* – пирит, *Cal* – кальцит, *Hem* – гематит. Сокращенные названия минералов даны по (Warr, 2021).

$$*R_p = \frac{\sum |y_i^{obs} - y_i^{calc}|}{\sum y_i^{obs}} - \text{фактор сходимости расчетного и экспериментального рентгеновских профилей, } y_i - \text{интенсивность в каждой экспериментальной точке рентгенограммы.}$$

Note. *Qz* – quartz, *Kfs* – K-feldspar, *Dol* – dolomite, *Chl* – chlorite, *Mca* – mica, *Mag* – magnetite, *Ant* – anatase, *Py* – pyrite, *Cal* – calcite, *Hem* – hematite. Abbreviated names of minerals are given according to (Warr, 2021).

$$*R_p = \frac{\sum |y_i^{obs} - y_i^{calc}|}{\sum y_i^{obs}} - \text{convergence factor of the calculated and experimental X-ray profiles, } y_i - \text{the intensity at each experimental point of the X-ray diffraction pattern.}$$

**Таблица 2.** Результаты геохимического анализа малых элементов (мкг/г) в песчаниках с юго-востока Анабарского щита

**Table 2.** Results of geochemical analysis of trace elements (ppm) in sandstones from the southeast of the Anabar Shield

№	23	822006-1/1	522009/1	522046/2	522050/1	822008/1	822008-2/1	822010/1	822010-1/1
La	9.62	9.16	15.7	5.19	4.92	15.5	13.7	4.97	4.81
Ce	15.6	14.4	31	8.07	11.1	31.8	19.7	9.39	7.37
Pr	1.7	1.8	3.57	0.83	1.37	3.24	2.13	1.16	0.81
Nd	5.95	7.58	11.8	2.59	5.57	11.8	8.48	4.62	2.73
Sm	0.94	1.87	1.44	0.45	0.93	1.74	1.92	1.09	0.36
Eu	0.23	0.49	0.19	0.06	0.28	0.52	0.59	0.28	0.064
Gd	0.85	1.63	1.01	0.36	1.02	1.57	1.89	0.89	0.41
Tb	0.13	0.22	0.17	0.048	0.13	0.2	0.27	0.14	0.055
Dy	0.81	1.35	0.72	0.34	0.79	1.15	1.65	0.79	0.3
Ho	0.18	0.26	0.12	0.065	0.16	0.24	0.37	0.17	0.061
Er	0.61	0.76	0.36	0.17	0.49	0.75	0.94	0.46	0.19
Tm	0.087	0.11	0.073	0.027	0.086	0.11	0.15	0.062	0.023
Yb	0.56	0.76	0.48	0.27	0.54	0.87	0.98	0.43	0.18
Lu	0.11	0.15	0.081	0.054	0.12	0.15	0.17	0.074	0.041
Th	2.35	4.99	5.5	1.41	2.7	12.5	2.72	1.23	1.54
Co	0.78	1.08	0.70	2.23	1.70	<0.5	3.44	1.32	1.05
Sc	2.46	3.23	3.55	0.96	2.01	3.82	2.29	1.52	0.81
Cr	16.1	8.39	12.4	4.41	63.1	41.1	8.66	10.8	3.14
Zr	260	92.8	128	79.7	212	262	393	185	78.2

таномангнетит, монацит, циркон, турмалин, оксиды и гидроксиды железа (рис. 5). Кроме того, в части образцов было показано доминирование КППШ над кварцем, как с помощью РСА, так и на основании результатов РФА (см. табл. 1).

Результаты РФА-анализа (см. табл. 1) позволили разделить пробы по соотношению обломочных зерен кварца и КППШ. Так, в обломочной фракции песчаников с р. Б. Куонамка (№ 1–22 на рис. 2) преобладают КППШ и кварц, процентное соотношение которых меняется в диапазонах 6–80% для первого и 14–90% для второго. Пробы с р. Дюсун (№ 23–25 на рис. 2) существенно кварцевые (>95%) с содержанием КППШ менее 5%. В песчаниках нередко широко развит доломит в качестве новообразованного минерала.

Характер изменения содержания породообразующих минералов в образцах с р. Б. Куонамка продемонстрирован на рис. 6. В целом снизу вверх по изученной части разреза породы становятся минералогически более зрелыми, на что указывает увеличение содержания кварцевых зерен и уменьшение количества неустойчивых зерен КППШ.

При проведении петрографического и рентгенофазового исследования нижнерифейских песчаников лабазтахской свиты (см. рис. 4–6, табл. 1) было установлено, что верхнюю часть изученного разреза слагают аркозовые алевриты и карбонатные породы. Ниже залегают алевритовые мелко-тонкозернистые аркозы с карбонатным цементом (Шванов, 1987; см. также ссылки в этой работе). В самой нижней части изученного разреза наблюдаются сильно обогащенные полевыми шпатами алевриты. Образцы с необычно высоким содержанием полевых шпатов (>60%) составляют примерно 12% от общей выборки (см. табл. 1). Согласно данным РФА, которые подтверждаются и результатами РСА, все полевые шпаты представлены калиевыми разновидностями.

### Геохимический анализ

Для получения информации о составе пород, слагавших палеоводосборы, был проведен анализ распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) в образцах песчаников (см. табл. 2), отобранных

Таблица 3. Результаты U-Pb датирования цирконов из образца № 23 с р. Дюсун  
Table 3. Results of U-Pb dating of zircons from sample No. 23 from the Dyusun stream

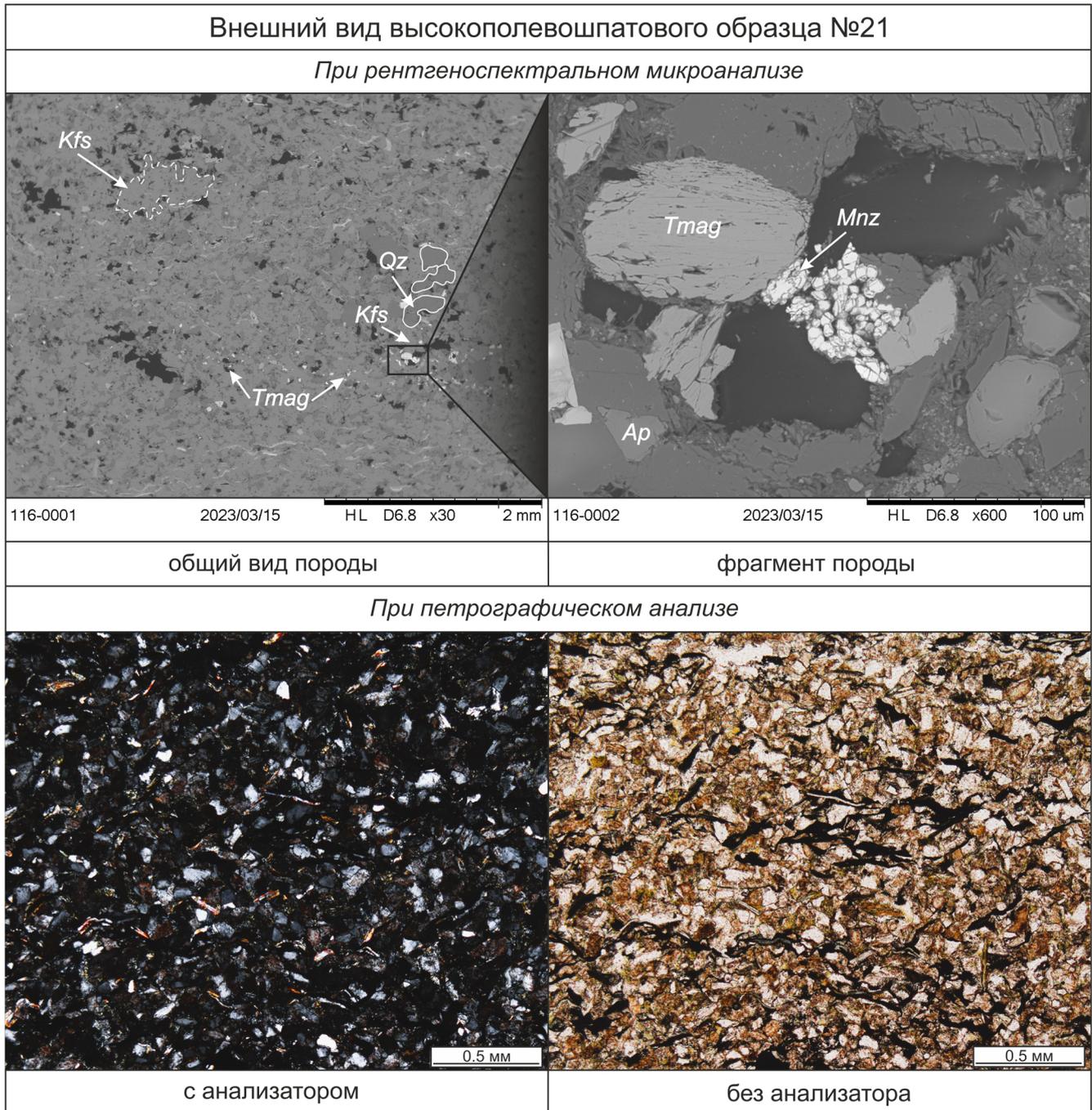
№ зерна	$^{206}\text{Pb}_c$ %	U, мкг/г	Th, мкг/г	$^{206}\text{Pb}^*$ , мкг/г	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	Возраст по отношению			Степень дискордантности, %	$\frac{^{238}\text{U}}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\pm\%$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\pm\%$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$	$\pm\%$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	$\pm\%$	Поправка	
						$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm\text{млн лет}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$											$\pm\text{млн лет}$
9	0.84	59	31	17.8	0.55	1939	30	1891	56	-3	2.85	1.8	0.1156	3.1	5.6	3.6	0.351	1.8	0.49
12	0.87	78	124	23.6	1.64	1944	27	1918	52	-1	2.84	1.6	0.1175	2.9	5.7	3.3	0.352	1.6	0.49
30	0.28	235	67	69.6	0.29	1911	18	1922	20	+1	2.90	1.1	0.1176	1.1	5.6	1.6	0.345	1.1	0.71
47	0.24	153	43	46.2	0.29	1935	23	1928	23	0	2.85	1.4	0.1177	1.3	5.7	1.9	0.350	1.4	0.73
32	0.39	37	55	11.2	1.54	1958	39	1934	88	-1	2.82	2.3	0.1182	4.9	5.8	5.4	0.355	2.3	0.42
46	0.21	143	164	41.6	1.18	1882	21	1921	25	+2	2.95	1.3	0.1185	1.4	5.5	1.9	0.339	1.3	0.67
15	1.43	29	23	8.79	0.82	1977	44	1944	116	-2	2.79	2.6	0.1187	6.5	5.9	7.0	0.359	2.6	0.38
7	0.34	187	185	55.6	1.02	1915	20	1948	22	+2	2.89	1.2	0.1189	1.2	5.7	1.7	0.346	1.2	0.70
4	0.12	112	34	34	0.31	1949	24	1944	31	0	2.83	1.4	0.1190	1.7	5.8	2.2	0.353	1.4	0.63
28	0.20	226	71	69.6	0.33	1977	19	1944	20	-2	2.79	1.1	0.1190	1.1	5.9	1.6	0.359	1.1	0.73
6	0.32	95	35	28.7	0.38	1949	25	1944	38	0	2.84	1.5	0.1192	2.1	5.8	2.6	0.353	1.5	0.59
52	0.57	62	80	19.1	1.33	1963	29	1959	69	0	2.81	1.7	0.1196	3.9	5.9	4.2	0.356	1.7	0.40
43	0.14	222	194	66	0.90	1915	18	1948	16	+2	2.89	1.1	0.1204	0.9	5.7	1.4	0.346	1.1	0.76
38	0.39	197	70	58.8	0.37	1920	20	1974	24	+3	2.88	1.2	0.1206	1.4	5.8	1.8	0.347	1.2	0.66
22	0.09	114	37	35.2	0.33	1987	24	1964	28	-1	2.77	1.4	0.1209	1.6	6.0	2.1	0.361	1.4	0.67
10	0.31	112	36	33.9	0.33	1954	24	1969	32	+1	2.83	1.4	0.1212	1.8	5.9	2.3	0.354	1.4	0.62
3	0.29	124	42	37.8	0.35	1968	22	1984	29	+1	2.80	1.3	0.1217	1.6	6.0	2.1	0.357	1.3	0.64
36	0.34	40	40	12.6	1.02	2011	36	1969	59	-2	2.73	2.1	0.1218	3.4	6.1	3.9	0.366	2.1	0.53
54	0.11	89	110	27.7	1.29	1996	26	1984	36	-1	2.75	1.5	0.1225	2.0	6.1	2.5	0.363	1.5	0.60
16	0.25	117	176	35.3	1.56	1944	23	2009	28	+3	2.84	1.4	0.1227	1.6	6.0	2.1	0.352	1.4	0.66
67	1.00	47	32	15.7	0.70	2118	72	2001	149	-6	2.57	4.0	0.1227	8.5	6.6	9.3	0.389	4.0	0.43
34	0.54	87	43	28	0.51	2048	26	1988	35	-3	2.67	1.5	0.1228	2.0	6.3	2.5	0.374	1.5	0.61
58	0.00	223	96	72.6	0.45	2072	27	1993	39	-4	2.64	1.5	0.1230	2.2	6.4	2.7	0.379	1.5	0.57
59	0.60	67	27	21.5	0.42	2039	47	1998	93	-2	2.69	2.7	0.1233	5.2	6.3	5.9	0.372	2.7	0.46
62	0.33	147	119	47.7	0.84	2072	32	1993	46	-4	2.64	1.8	0.1233	2.6	6.4	3.2	0.379	1.8	0.58
27	0.13	82	60	25.2	0.76	1968	27	2013	40	+2	2.80	1.6	0.1234	2.3	6.1	2.8	0.357	1.6	0.58
53	0.11	194	1	59.9	0.003	1977	20	2004	19	+1	2.78	1.2	0.1240	1.1	6.1	1.6	0.359	1.2	0.73
50	0.06	150	64	47.9	0.44	2044	23	2021	23	-1	2.68	1.3	0.1241	1.3	6.4	1.8	0.373	1.3	0.70
35	0.20	49	82	15.7	1.73	2025	33	2012	46	-1	2.71	1.9	0.1243	2.6	6.3	3.2	0.369	1.9	0.59
8	0.36	125	99	38.9	0.82	1987	22	2023	31	+2	2.77	1.3	0.1254	1.8	6.2	2.2	0.361	1.3	0.60
56	0.81	85	165	27.8	2.00	2076	41	2042	90	-2	2.63	2.3	0.1267	5.1	6.6	5.6	0.380	2.3	0.41
69	1.00	58	102	18.3	1.83	2015	59	2050	116	+2	2.72	3.4	0.1268	6.6	6.4	7.4	0.367	3.4	0.46
1	0.48	71	79	23.3	1.14	2076	28	2095	36	+1	2.63	1.6	0.1290	2.0	6.8	2.6	0.380	1.6	0.62
57	0.14	114	29	37.6	0.26	2095	36	2077	88	-1	2.60	2.0	0.1291	5.0	6.8	5.4	0.384	2.0	0.37
65	0.00	185	93	58.6	0.52	2025	30	2094	41	+3	2.71	1.7	0.1294	2.3	6.6	2.9	0.369	1.7	0.59

Таблица 3. Окончание  
 Table 3. Ending

№ зерна	$^{206}\text{Pb}_c$ %	U, мкг/г	Th, мкг/г	$^{206}\text{Pb}^*$ , мкг/г	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	Возраст по отношению			Степень дискордантности, %	$\frac{^{238}\text{U}}{^{206}\text{Pb}^*}$	±%	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$	±%	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$	±%	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	±%	Поправка
						$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	±млн лет	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$										
26	0.54	210	92	67.7	0.45	2053	21	2092	+2	2.66	1.2	0.1296	1.1	6.7	1.6	0.375	1.2	0.72
70	0.24	173	61	56.1	0.36	2067	32	2104	+2	2.64	1.8	0.1296	2.4	6.8	3.0	0.378	1.8	0.58
13	0.31	72	73	23.8	1.06	2109	36	2114	0	2.59	2.0	0.1304	3.7	7.0	4.2	0.387	2.0	0.48
71	0.89	48	330	16.2	7.06	2118	148	2130	+1	2.57	8.2	0.1326	9.2	7.1	12.3	0.389	8.2	0.67
11	1.00	18	36	6.66	2.05	2297	62	2316	+1	2.34	3.2	0.1476	5.9	8.7	6.7	0.428	3.2	0.48
55	0.53	77	43	29.4	0.57	2369	30	2386	+1	2.25	1.5	0.1539	1.4	9.4	2.1	0.444	1.5	0.72
21	0.07	161	83	65.8	0.53	2505	27	2522	+1	2.11	1.3	0.1663	0.9	10.9	1.5	0.475	1.3	0.83
29	0.29	73	156	32.5	2.20	2695	35	2681	-1	1.93	1.6	0.1838	1.3	13.1	2.1	0.519	1.6	0.78
19	0.16	88	125	39.8	1.46	2720	60	2712	0	1.91	2.7	0.1871	2.7	13.5	3.8	0.525	2.7	0.70
33	0.41	73	61	32.7	0.87	2716	35	2727	0	1.91	1.6	0.1882	1.4	13.6	2.2	0.524	1.6	0.75
49	0.18	89	97	40.1	1.13	2725	33	2733	0	1.90	1.5	0.1887	1.1	13.7	1.9	0.526	1.5	0.80
5	0.14	26	43	11.5	1.72	2695	55	2755	+2	1.93	2.5	0.1908	2.7	13.7	3.6	0.519	2.5	0.68
23	0.08	162	141	73.2	0.90	2733	27	2750	+1	1.89	1.2	0.1911	0.7	13.9	1.4	0.528	1.2	0.87
42	0.07	79	65	36.7	0.85	2783	36	2771	0	1.85	1.6	0.1938	1.0	14.4	1.8	0.540	1.6	0.85
60	0.66	48	27	23.4	0.59	2916	80	2839	-3	1.75	3.4	0.2012	3.9	15.9	5.2	0.572	3.4	0.66
61	0.52	47	24	23.5	0.53	2949	76	2847	-4	1.72	3.2	0.2024	3.2	16.2	4.5	0.580	3.2	0.71
24	0.23	72	28	36.3	0.40	2961	40	2878	-3	1.72	1.7	0.2062	1.2	16.6	2.1	0.583	1.7	0.81
25	0.38	103	93	49.7	0.93	2875	35	2878	0	1.78	1.5	0.2064	1.0	16.0	1.8	0.562	1.5	0.83
48	0.54	37	12	18.4	0.34	2936	52	2905	-1	1.73	2.2	0.2101	2.0	16.7	2.9	0.577	2.2	0.74
41	0.28	51	27	25.3	0.55	2928	45	2920	0	1.74	1.9	0.2112	1.4	16.8	2.4	0.575	1.9	0.81
68	0.15	108	163	55	1.56	3006	60	2924	-3	1.68	2.5	0.2122	1.6	17.4	3.0	0.594	2.5	0.83
20	0.14	140	42	58.7	0.31	2558	27	2760	+7	2.05	1.3	0.1923	1.8	12.9	2.2	0.487	1.3	0.59
40	0.86	88	68	34.2	0.80	2409	30	2601	+7	2.21	1.5	0.1744	1.5	10.9	2.1	0.453	1.5	0.72
44	0.32	73	61	28	0.86	2386	30	2589	+8	2.23	1.5	0.1741	2.4	10.7	2.9	0.448	1.5	0.54
45	0.14	108	139	28.7	1.32	1736	20	1916	+9	3.24	1.3	0.1185	1.8	5.0	2.3	0.309	1.3	0.59
64	1.11	48	77	16.5	1.65	2160	75	2534	+15	2.51	4.1	0.1672	6.8	9.2	7.9	0.398	4.1	0.51
51	0.00	219	99	56.5	0.47	1691	16	2072	+18	3.33	1.1	0.1287	1.0	5.3	1.5	0.300	1.1	0.74
18	0.95	304	357	74.4	1.21	1616	16	1988	+19	3.51	1.1	0.1225	1.3	4.8	1.7	0.285	1.1	0.64
14	0.69	256	989	60.6	3.99	1571	17	1969	+20	3.63	1.2	0.1207	1.5	4.6	1.9	0.276	1.2	0.63
2	0.32	215	407	43.4	1.95	1361	13	2007	+32	4.26	1.1	0.1242	1.6	4.0	1.9	0.235	1.1	0.58
39	1.27	40	91	10.9	2.35	1770	34	2601	+32	3.17	2.2	0.1741	4.0	7.6	4.5	0.316	2.2	0.48
17	1.15	105	261	18.8	2.57	1223	18	1872	+35	4.78	1.6	0.1128	3.9	3.3	4.2	0.209	1.6	0.37
37	1.75	15	39	3.17	2.72	1444	53	2211	+35	3.98	4.1	0.1394	9.4	4.8	10.3	0.251	4.1	0.40
63	1.26	266	323	46.7	1.25	1202	19	2012	+40	4.89	1.7	0.1255	4.2	3.5	4.6	0.205	1.7	0.38

Примечание. Ошибки составляют ±1σ, Pb<sub>c</sub> и Pb\* обозначают нерадиогенную и радиогенную части соответственно. Ошибка стандартной калибровки составила 0,29%. Нерадиогенный Pb скорректирован с использованием измеренного <sup>204</sup>Pb.

Note. Errors are ±1σ, Pb<sub>c</sub> and Pb\* indicate the common and radiogenic portions, respectively. Error in Standard calibration was 0,29%. Common Pb corrected using measured <sup>204</sup>Pb.

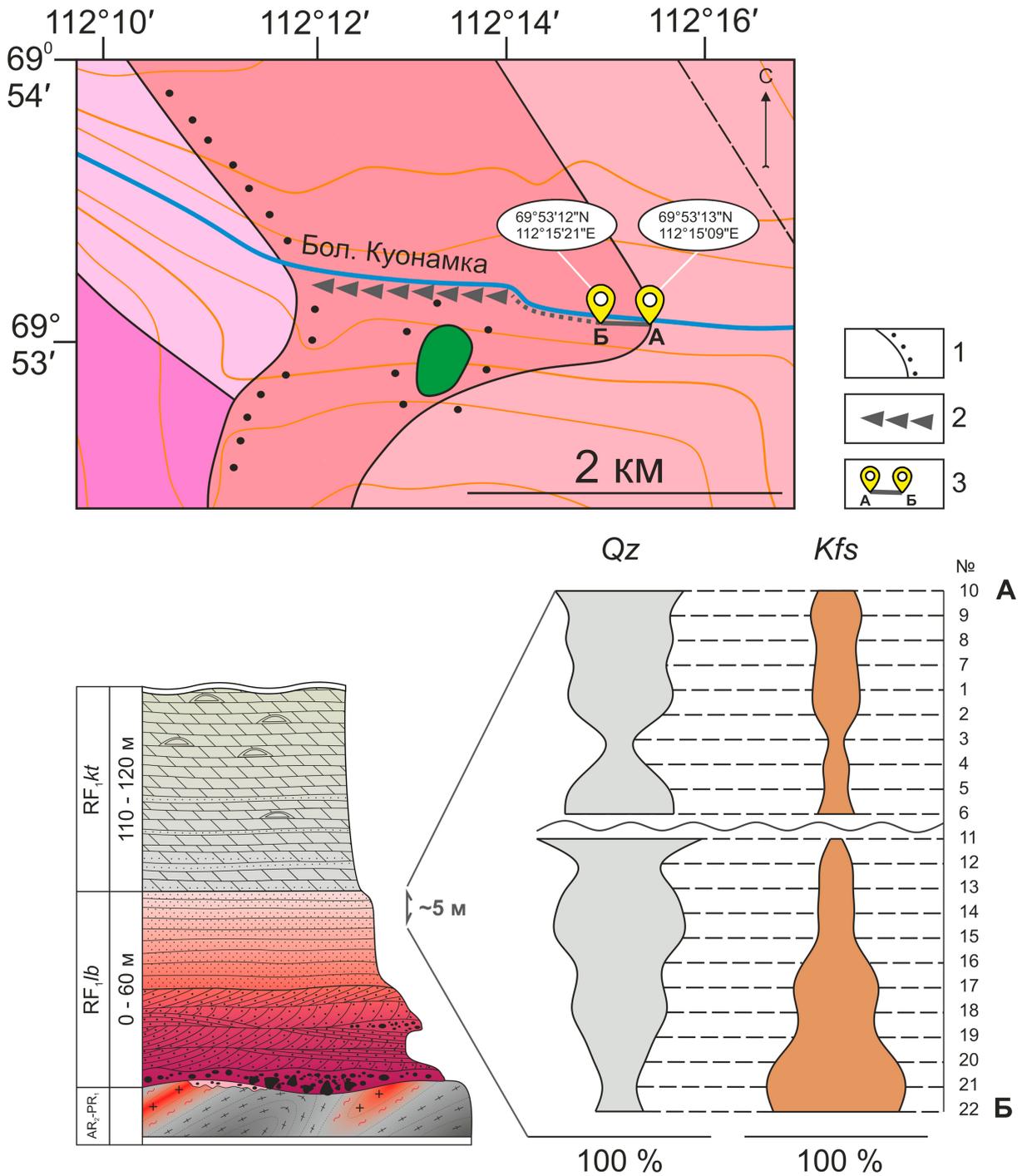


**Рис. 5.** Шлиф образца №21 (см. рис. 6), сверху – при РСА, внизу – при петрографическом анализе. При РСА на общем виде породы: обломочные зерна кварца имеют более темные тона, яркие светлые минералы являются рудными (в основном титаномагнетит).

*Tmag* – титаномагнетит, *Mnz* – монацит, *Ap* – апатит, *Kfs* – калиевый полевой шпат, *Qz* – кварц. Сокращенные названия минералов даны по (Warr, 2021).

**Fig. 5.** Thin section of sample №21 (see fig. 6), at the top is X-ray diffraction analysis, at the bottom is petrographic analysis. X-ray diffraction analysis of the general appearance of the rock: detrital quartz grains have darker tones bright light minerals are ore minerals (mainly titanomagnetite).

*Tmag* – titanomagnetite, *Mnz* – monazite, *Ap* – apatite, *Kfs* – K-feldspar, *Qz* – quartz. Abbreviated names of minerals are given according to (Warr, 2021).



**Рис. 6.** Сверху – карта-схема места отбора образцов с реки Б. Куонамка на основе (Государственная..., 1965), внизу – положение отобранных образцов в стратиграфической колонке и характер изменения состава сверху-вниз по изученной части разреза.

1 – несогласные границы, 2 – осыпи, 3 – интервал опробования. *Qz* – кварц, *Kfs* – калиевые полевые шпаты, *Dol* – доломит. Остальные условные обозначения см. на рис. 1 и рис. 2. Вариации цветов в колонке соответствуют цветам пород.

**Fig. 6.** At the top is a schematic map of the sampling site from the B. Kuonamka River based on (State..., 1965), at the bottom is the position of the samples in the stratigraphic column and the nature of the change in composition from top to bottom along the studied part of the section.

1 – unconformable boundaries, 2 – scree, 3 – sampling interval. *Qz* – quartz, *Kfs* – potassium feldspars, *Dol* – dolomite. For other symbols see fig. 1 and fig. 2. The color variations in the column correspond to the colors of the rocks.

с междуречья Б. Куонамка-Куранах (см. рис. 2), и построены графики нормированных содержаний этих элементов (рис. 7). В настоящей работе нормирование произведено на хондрит C1 (Sun, McDonough, 1989). В целом для изученных образцов песчаников лабазтахской свиты наблюдается схожая картина в распределении РЗЭ (см. рис. 7а) – преобладание легких редкоземельных элементов (ЛРЗЭ) и отрицательная европиевая аномалия ( $(Eu/Eu^* = Eu_{оп}/Eu_{с1}/(Sm_{оп}/Sm_{с1} * Gd_{оп}/Gd_{с1})^{1/2} < 1)$ ). Значения европиевой аномалии ( $Eu/Eu^*$ ) находятся в диапазоне 0.46–0.96, что указывает на преобладание пород кислого состава в питающей провинции (Taylor, McLennan, 1985). Для определения породного состава питающих провинций также использовались дополнительные диаграммы La/Sc–Th/Co (см. рис. 7б, McLennan et al., 1993) и Cr/Th–Th/Sc (см. рис. 7в, Condie, Wronkiewicz, 1990). Точки образцов на диаграмме La/Sc–Th/Co характеризуются высокими числовыми значениями и концентрируются в поле, характерном для магматических пород кислого состава. Доля участия пород среднего и основного состава совсем незначительна, что подтверждается локализацией точек на диаграмме Cr/Th–Th/Sc. На диаграмме Zr/Sc–Th/Sc точки песчаников тяготеют к тренду рециклинга (см. рис. 7г). Вероятно, указанные породы сложены преимущественно литогенным материалом (Юдович, Кетрис, 2000), что позволяет сделать вывод о наличии промежуточных источников сноса.

### Локальное U-Pb SHRIMP-Пе датирование обломочного циркона

Для изучения обломочного циркона использовались образцы песчаников, отобранные с р. Дюсун (№ 23–25 на рис. 2). Обнажение представляет собой коренной выход песчаников и слагает небольшую уступ с видимой мощностью 1.5–2.0 м ( $69^{\circ}46'58.4''N$   $112^{\circ}19'41''E$ ), что позволило отобрать для выделения обломочных цирконов невыветрелые образцы.

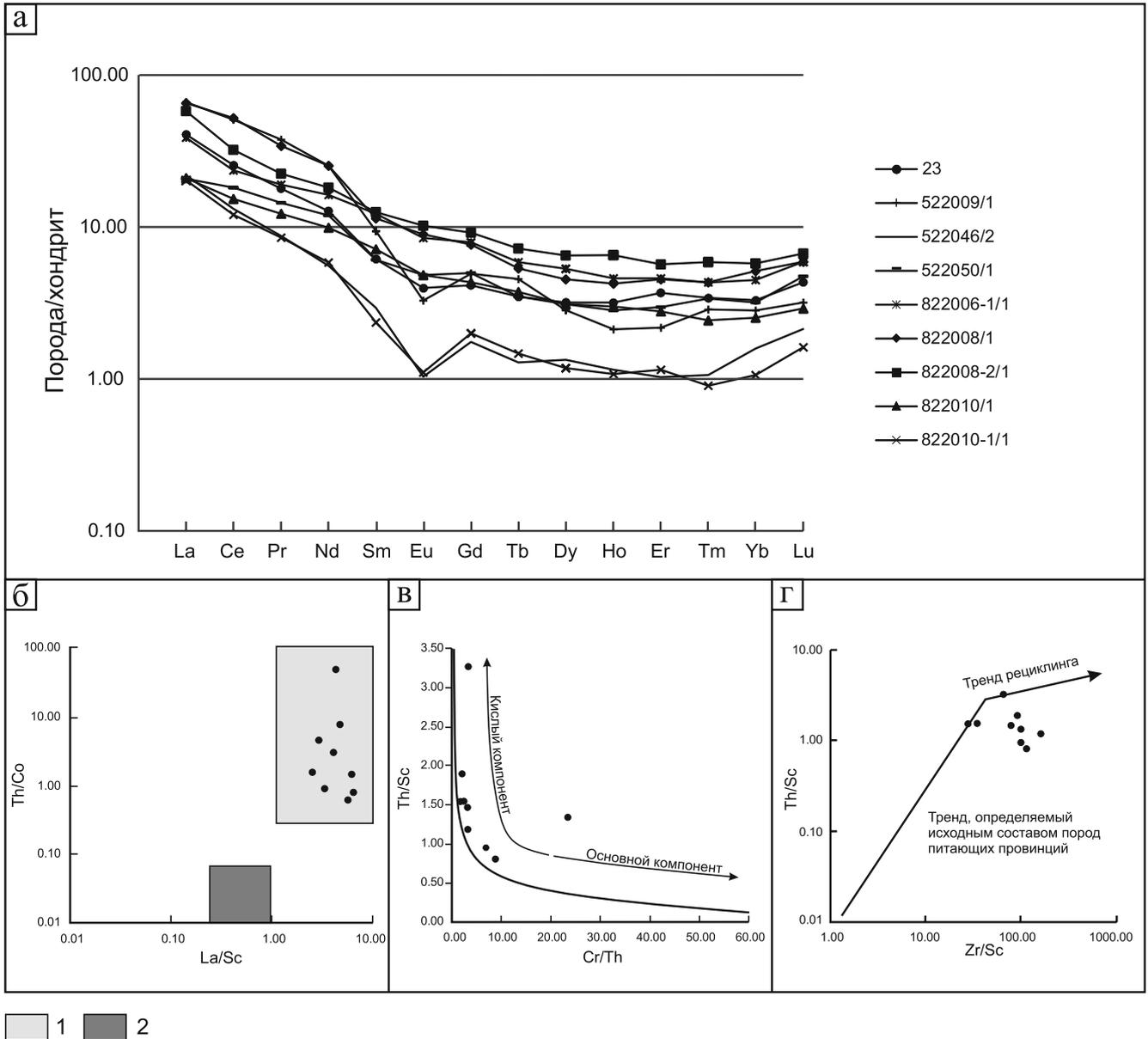
Всего было продатировано 69 зерен, дискордантность уран-свинцовых возрастов (D) в 60 из которых оказалась менее 10% (табл. 3). Значения возрастов, полученные в центральной и краевой частях зерен цирконов, не показали наличия систематического омоложения краевой части относительно центральной.

Обломочные цирконы представлены желтыми прозрачными и полупрозрачными обломками изометричной формы (рис. 8). Размер зерен от 80 до 180 мкм, с коэффициентом удлинения от 1–2 в редких случаях до 3. Поверхность цирконов часто иссечена трещинками, кавернами или имеет шагреневую текстуру. Степень окатанности зерен и обломков высокая, с формированием округлых и овальных форм.

Все обломочные зерна имеют преимущественно слабое катодолюминесцентное свечение. Умеренное или яркое свечение наблюдается в виде фрагментов тонкой (циркон 27, 35) и грубой (циркон 60) полосчатой (циркон 12) или осцилляторной (цирконы 2, 41, 42, 44, 53, 62) магматической зональности с элементами секториальности (цирконы 34, 35, 36). Встречаются зерна и обломки с почти монотонной светимостью в катодных лучах (цирконы 7, 11, 22, 30, 28, 55), следами магматической зональности (цирконы 3, 4, 10, 14, 16, 18, 21, 23, 25, 26, 28, 29, 48, 50, 58, 59, 61, 63, 65) или фрагментами различных типов зональности (цирконы 9, 11, 32, 33, 38, 49, 51, 52, 56, 60, 64, 66, 67, 68, 69, 70, 71). Некоторые обломки и зерна имеют полифазное строение: отчетливо зональная центральная часть и незональная или с менее явной зональностью периферическая часть, которая также может отличаться свечением (цирконы 13, 17, 18, 37, 39, 44, 53, 57, 62). Такая внутренняя структура обычно отражает первично магматическое происхождение циркона или его комплексную метаморфическую переработку (Corfu et al., 2003). Для восстановления истории формирования терригенных пород лабазтахской свиты в пределах Восточно-Анабарского бассейна возрасты обломочных зерен цирконов были вынесены на график с конкордией в координатах  $^{207}Pb/^{235}U$ – $^{206}Pb/^{238}U$ , после чего исходные значения отфильтровывались по дискордантности ( $D < 10\%$ ) и анализировались с помощью диаграммы KDE, построенной в программе IsoplotR (Vermeesch, 2018).

На графике с конкордией отчетливо выделяются несколько возрастных кластеров фигуративных точек локальных изотопных анализов обломочного циркона (рис. 9а). Изученные зерна обломочного (детритового) циркона характеризуются конкордантными возрастными в интервале 1800–3000 млн лет, а также выделяется группа из 9 зерен с нарушенной в разной степени изотопной системой. На диаграмме распределения возрастов (KDE) отчетливо фиксируются три пика со средневзвешенными возрастными 1965 ± 5, 2750 ± 7 и 2890 ± 9 млн лет соответственно, а также менее представительный (5 анализов) пик с возрастом 2095 ± 14 млн лет. В группе со средневзвешенным возрастом 1965 млн лет 20% фракции представлены окатанными зернами с шагреневой поверхностью, трещинками, кавернами и сколами, тогда как в других группах с более древними датировками доля окатанных зерен составляет уже более 30% (см. рис. 8).

Для группы дискордантных зерен были построены две дискордии (рис. 10), верхнее пересечение которых с конкордией соответствует возрастам 2083 ± 32 и 2866 ± 99 млн лет и сопоставимо с возрастными пиков кривой KDE 2095 и 2890 млн лет соответственно. Повышенные величины среднего квадрата взвешенных отклонений (3.3, 2.0) не позволяют рассматривать полученную корреляцию,

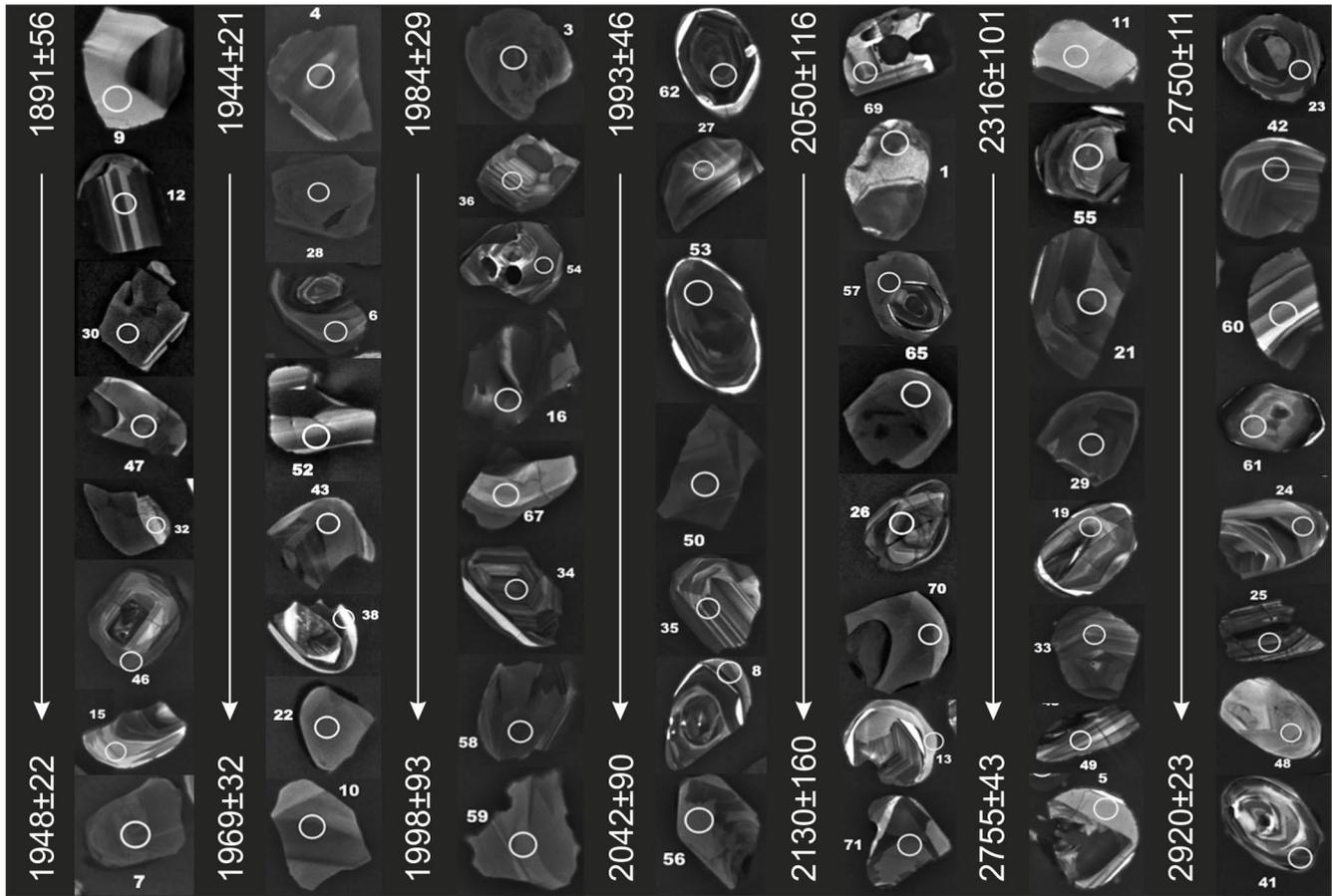


**Рис. 7.** Возможные источники сноса для песчаников лабазтахской свиты юго-востока Анабарского щита: а – спектры распределений РЗЭ в песчаниках, б–в – породный состав питающих провинций на диаграмме La/Sc-Th/Co (б) по (McLennan et al., 1993) и доля участия компонентов различного состава в формировании песчаников (в) по (Condie, Wronkiewicz, 1990), г – положение точек состава песчаников на диаграмме Zr/Sc-Th/Sc по (Taylor, McLennan, 1985).

1 – поле значений, характерное для магматических пород кислого состава, 2 – поле значений, характерное для магматических пород основного состава.

**Fig. 7.** Possible provinces for sandstones of the Labaztakh Formation of the south-eastern Anabar shield: а – REE distribution spectra in sandstones, б–в – rock composition of source provinces on the La/Sc-Th/Co diagram (б) according to (McLennan et al., 1993) and the proportion of components in the genesis of sandstones (в) according to (Condie, Wronkiewicz, 1990), г – position of sandstone composition points on the Zr/Sc-Th/Sc diagram according to (Taylor, McLennan, 1985).

1 – field of values characteristic of igneous rocks of acidic composition, 2 – field of values characteristic of igneous rocks of basic composition.



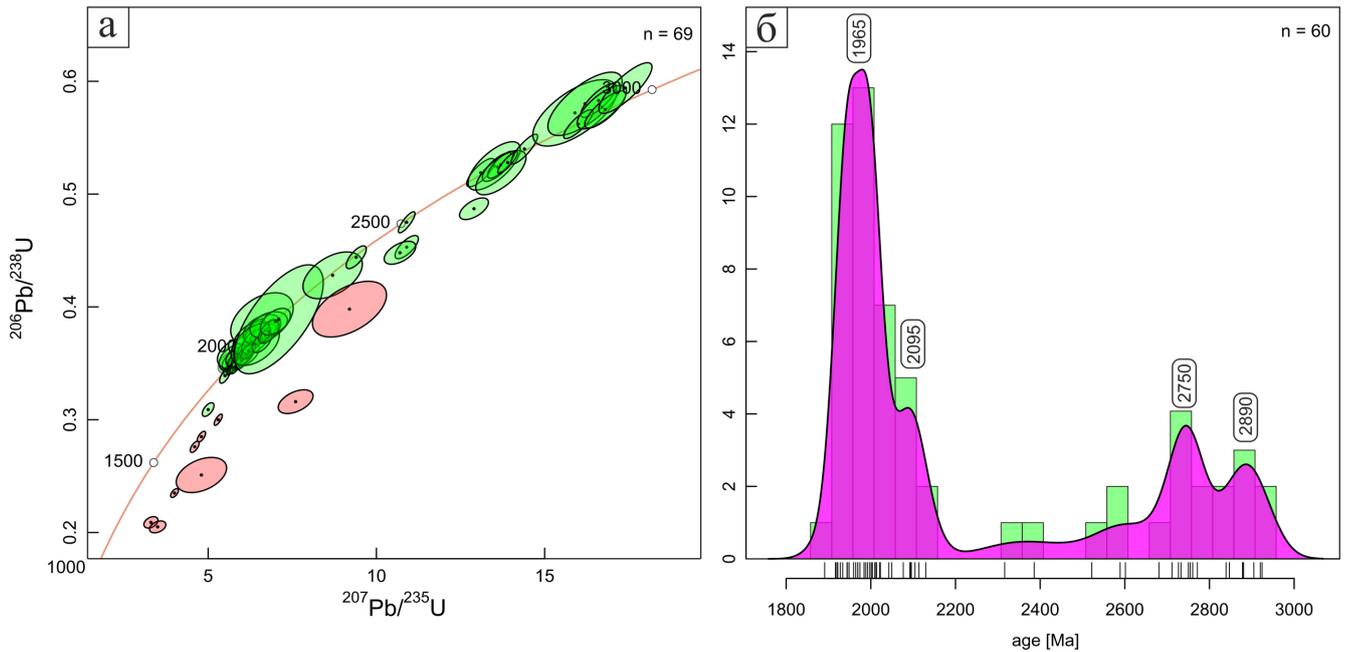
**Рис. 8.** Морфология цирконов из образцов нижнерифейских песчаников лабазтахской свиты с р. Дюсун.

**Fig. 8.** Morphology of zircons from samples of Lower Riphean sandstones of the Labaztakh Formation from the Dyusun stream.

как отражающую реальную возрастную зависимость (накопление радиогенного свинца) генетически связанных зерен обломочного циркона. В то же время близость значений возрастов, соответствующих верхнему пересечению рассчитанного тренда, пикам распределения конкордантных датировок может указывать на общий источник сноса и происхождение дискордантных зерен из конкордантных кластеров. В этом случае нарушение замкнутости изотопной системы (потеря радиогенного свинца) обломочных зерен происходило в относительно недавнее время, существенно позже формирования песчаника.

Необходимо отметить геохимические различия выделенных возрастных групп обломочного циркона. Так в цирконах наиболее молодой группы (~1960–2000 млн лет) содержание урана варьирует в широких пределах 18–235 мкг/г, тория: 1–330 мкг/г, торий-урановые отношения находятся в диапазоне 0.003–7.0, что указывает на присутствие как зерен магматического происхождения, так и подверг-

шихся метаморфическому изменению (аномальное Th-U отношение для 53 зерен – 0.003). В более древних цирконах содержания урана и тория изменяются в более узком интервале: U = 26–162 мкг/г, Th = 12–163 мкг/г, Th-U = 0.34–2.20, характерном для магматических пород. В целом, изученный обломочный циркон характеризуется, как преимущественно обогащенный торием. Так из 69 проанализированных зерен в 20 Th-U отношение находится в интервале 0.3–0.5, а в 39 зернах это отношение более 0.8. Из девяти зерен циркона с дискордантностью более 10% только 4 имеют повышенное содержание урана и тория (от 215 и 320 до 305 и 990 мкг/г, соответственно), которое может обусловить повышенную метамиктность кристаллической решетки циркона и привести к частичной нарушенности уран-свинцовой системы. В остальных случаях дискордантными оказались анализы, выполненные для внешних, часто трещиноватых зон зерен с повышенным содержанием нерадиогенного свинца (до 2% во фракции  $^{206}\text{Pb}$ , см. табл. 3).



**Рис. 9.** а – график с конкордией в координатах  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ , б – диаграмма KDE со средневзвешенными значениями основных пиков по данным обломочных цирконов из образцов песчаников лабазтахской свиты с руч. Дюсун.

На графике с конкордией эллипсы ошибок для индивидуальных замеров приведены на уровне  $1\sigma$ , красным цветом залиты эллипсы с дискордантностью уран-свинцовых возрастов более 10%, а зеленым цветом менее 10% (условно конкордантные). На диаграмме KDE по оси абсцисс – возраст зерна в млн лет, по оси ординат – количество зерен, n – количество значений, принятых для построения. Выбранные параметры: kernel bandwidth = 30, histogram binwidth = 50.

**Fig. 9.** а – graph with concordia in the coordinates  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ , б – KDE diagram with weighted average values of the main peaks according to detrital zircon data from samples of sandstones of the Labaztakh Formation from the Dyusun Creek.

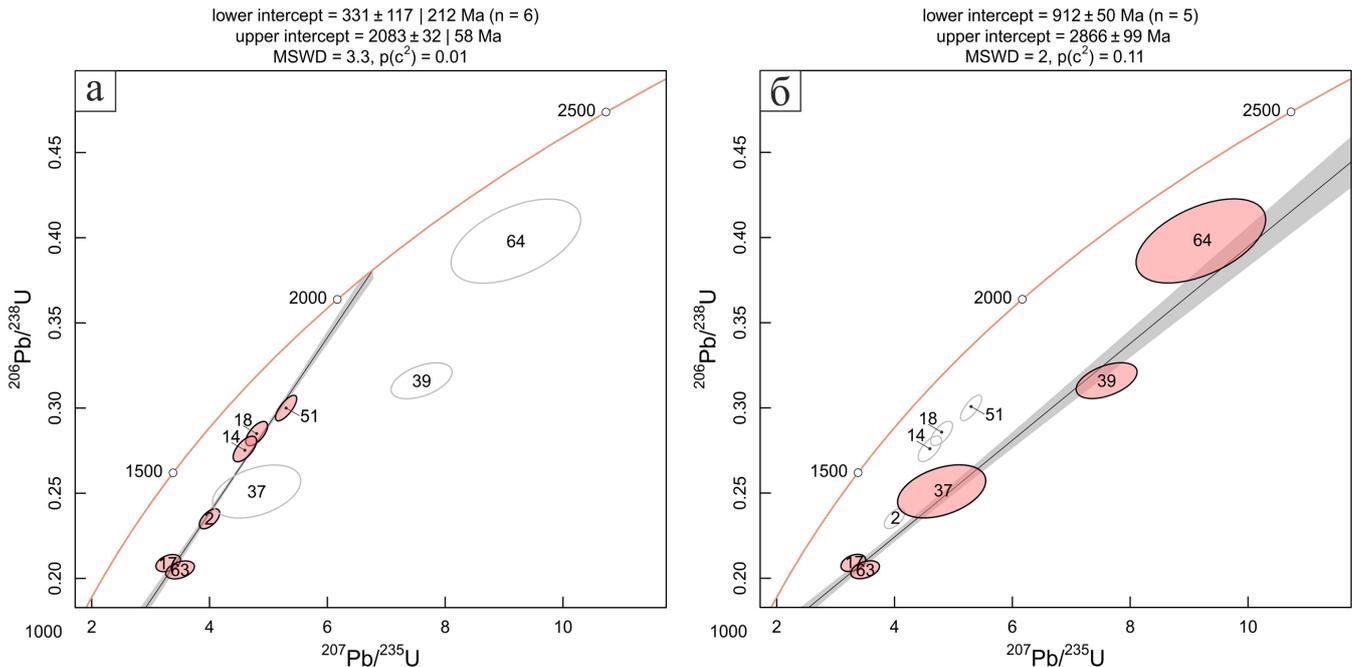
In the concordia plot the error ellipses for individual measurements are shown at the  $1\sigma$ , the ellipses with a discordance of uranium-lead ages of more than 10% are filled in red, and those with a discordance less than 10% (conditionally concordant) are filled in green. In the KDE diagram the abscissa axis is the grain age in million years, the ordinate axis is the number of grains, n is the number of values accepted for the plot. Selected parameters: kernel bandwidth = 30, histogram binwidth = 50.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Совместный рентгенофазовый и петрографический анализ валовых проб позволил установить, что вверх по разрезу породы становятся минералогически более зрелыми (см. рис. 6) и выявить следующую закономерность: фигуративные точки образцов, отобранных из коренных выходов с р. Б. Куонамка, на классификационной диаграмме Петтиджона (Петтиджон и др., 1976) попали в поля, соответствующие аркозам и субаркозам, в то время как все образцы, отобранные из коренных и элювиальных выходов, расположенных в междуречье Б. Куонамка-Куранах (см. рис. 2), тяготеют к полям, характерным для кварцевых аренитов (рис. 11). Согласно диаграммам Дикинсона (Dickinson, 1985) подавляющее большинство образцов оказалось в полях размыва континентального блока, попадая преимущественно в области переходного типа и внутрикратонного бассейна. Поскольку в изуча-

емых шлифах из обломков пород встречается только поликристаллический кварц, который согласно представлениям, охарактеризованным в (Петтиджон и др., 1976) и (Dickinson, 1985) учитывается как минерал, то исходные диаграммы получились одинаковыми.

В результате проведения РФА было установлено, что все полевые шпаты в образцах являются калиевыми. Это же подтверждается и при микроскопическом изучении шлифов – подавляющее большинство полевых шпатов подвергается разложению с образованием бурого, буровато-красного налета, уменьшающего прозрачность зерен и характерного для калиевых разновидностей. Кроме того, в некоторых зернах видна спайность и решетчатое строение двойниковых пластин. Значительное обогащение песчаников полевошпатовой составляющей следует связывать прежде всего с близостью коренных полевошпатовых пород, на что указывают четкие контуры зерен и отсутствие явных при-



**Рис. 10.** Графики с конкордией для дискордантных зерен.

а – цирконы 2, 14, 17, 18, 51, 63, б – цирконы 17, 37, 39, 63, 64. Сверху – параметры пересечения с конкордией, полученные в программе IsoplotR.

**Fig. 10.** Concordia plots for discordant grains.

а – zircons 2, 14, 17, 18, 51, 63, б – zircons 17, 37, 39, 63, 64. Above are the parameters of intersection with concordia obtained in the IsoplotR program.

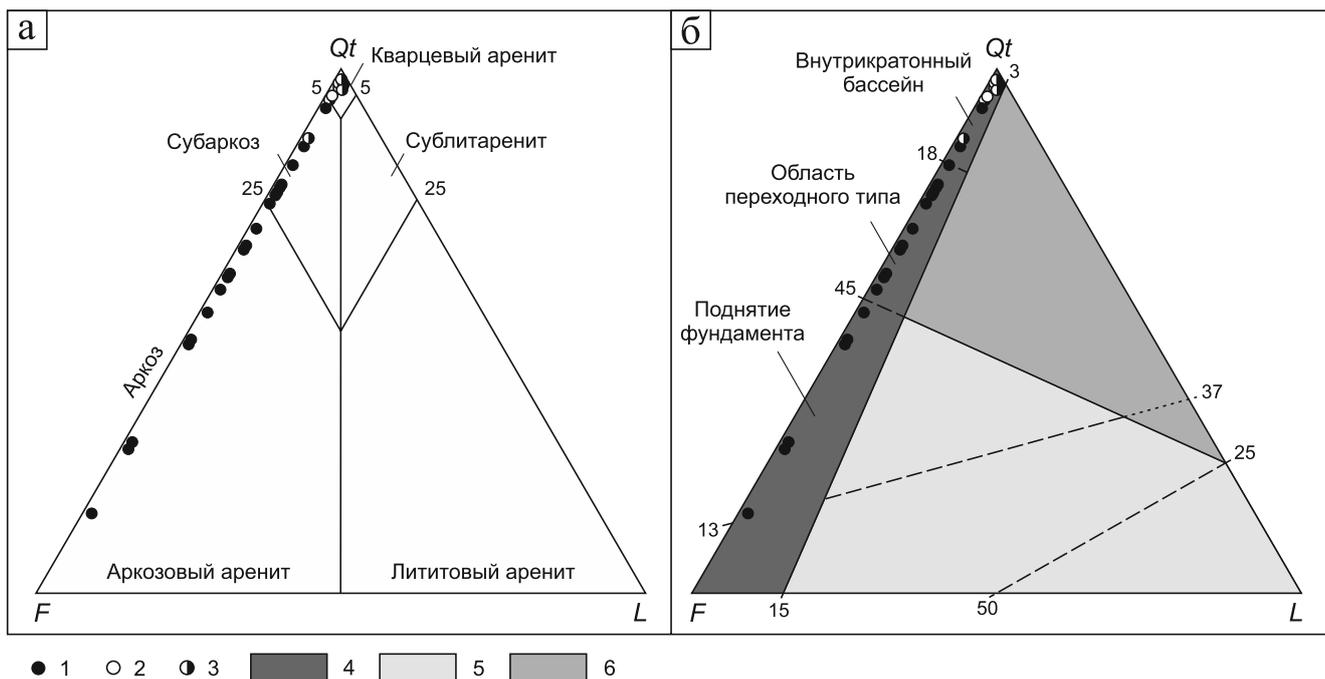
знаков дополнительного привноса калия посредством щелочного метасоматоза (Купцова, 2012).

Буроватый налет изучался с помощью РСА. Результаты анализа позволили установить, что пленки на полевых шпатах и цементирующая масса между терригенными зёрнами представлена оксидами железа и микрокристаллическими компонентами обломочной фракции песчаников. Пластинки гематита часто могут замещать биотит и ориентироваться в одном направлении, что свидетельствует об одностороннем давлении, воздействующем на породы.

Проявленный отрицательный тренд графиков распределения РЗЭ (см. рис. 7а), значения европиевой аномалии ( $Eu/Eu^* < 1$ ) и концентрация точек на диаграммах La/Sc–Th/Co (см. рис. 7б) и Cr/Th–Th/Sc (см. рис. 7в) указывают на размыв материнских пород кислого состава. Средневзвешенный возраст наиболее значимых популяций циркона из песчаника лабазтахской свиты с р. Дюсун –  $1965 \pm 5$ ,  $2095 \pm 14$ ,  $2750 \pm 7$  и  $2890 \pm 9$  млн лет. При датировании 430 зерен обломочного циркона, отобранных по профилю поперек основных структур Анабарского щита (бассейн р. Б. Куонамка), также было установлено преобладание палеопротерозойского циркона: 52% зерен циркона имели возраст

1.8–2.0 млрд лет (в среднем  $1954 \pm 6$  млн лет), 34% зерен с возрастом в интервале 2.4–2.8 млрд лет и максимумами ~2.6–2.7 млрд лет (Raquette et al., 2017). Кроме того, была выделена группа цирконов (7%) с возрастaми 3.0–3.4 млрд лет (там же). В работе (Khudoley et al., 2015) картина распределения возрастoв обломочных цирконов для пробы с востока Анабарского щита схожая: 62.5% зерен имели возраст 1.9–2.1 млрд лет, 37.5% – 2.4–2.9 млрд лет. Отличное от предыдущих возрастное распределение характерно для пробы с севера Анабарского щита (образец 678, Khudoley et al., 2015), в которой преобладающую долю – 63% – составляют зёрна с возрастом 1.6–1.9 млрд лет.

В изученной нами пробе песчаника р. Дюсун максимальный возраст зерна циркона соответствует величине  $2924 \pm 27$  млн лет, а отсутствие более древних зерен, вероятно, объясняется отличным по составу источником размыва (Raquette et al., 2017). В то же время анализ KDE-диаграммы (см. рис. 9б) показал примерно сходные результаты с другой пробой с востока Анабарского щита (образец 571-3, Khudoley et al., 2015): 66% зерен циркона с возрастом 1.8–2.1 млрд лет, 22% в интервале 2.3–2.8 млрд лет и 12% с возрастом 2.84–2.92 млрд лет.



**Рис. 11.** Классификационные диаграммы для нижнерифейских песчаников лабазтахской свиты юго-востока Анабарского щита: а – по (Петтиджон и др., 1976), б – по (Dickinson, 1985).

1 – образцы из коренных выходов с р. Б. Куонамка, 2 – образцы из коренных выходов с руч. Дюсун, 3 – образцы из элювиальных выходов с междуречья Б. Куонамка-Куранах, 4–6 – поля размыва: 4 – континентального блока, 5 – магматических дуг, 6 – оргенных областей.

Qt – кварц (в том числе поликристаллический), Qm – кварц монокристаллический, F – калиевые и натрий-кальциевые полевые шпаты, L – обломки пород.

**Fig. 11.** Classification diagrams for the Lower Riphean sandstones of the Labaztakh Formation of the south-eastern Anabar shield: а – according to (Pettijohn et al., 1976), б – according to (Dickinson, 1985).

1 – samples from bedrock outcrops from the B. Kuonamka River, 2 – samples from bedrock outcrops from the Dyusun Creek, 3 – samples from eluvial outcrops from the B. Kuonamka-Kuranakh interfluve, 4–6 – erosion fields: 4 – continental block, 5 – magmatic arcs, 6 – recycled orogen.

Qt – quartz (including polycrystalline), Qm – monocrystalline quartz, F – potassium and sodium-calcium feldspars, L – rock fragments.

Кластеры древнего циркона изученного образца песчаника р. Дюсун (2870–2890 млн лет, см. рис. 9, 10), коррелируют со временем формирования анабарского эндербит-чарнокит-мигматитового комплекса, хотя возраст последнего несколько моложе 2830–2870 млн лет (U-Pb SHRIMP II по циркону, (Гусев, 2013)). Калиевый гранитоидный магматизм проявляется позже эндербитового, с возрастом  $2764 \pm 6$  млн лет чарнокитов и апочарнокитовых аляскитовых гранитогнейсов (Государственная..., 2016), и может быть сопоставлен с более молодым кластером обломочного циркона (2750 млн лет).

Возрастной кластер обломочного циркона (~1965 млн лет) изученного образца песчаника вероятно связан с проявлением одного из этапов протерозойского ареального гранулитового метаморфизма, широко представленного на Анабарском щите (Розен и др., 2000; Государственная..., 2016; Сергеева, 2021). Помимо метаморфизованных ар-

хей-протерозойских пород, источником циркона могут являться протерозойские магматические комплексы: маганский аляскит-лейкогранит-мигматитовый и билляхский гранодиорит-гранит-граносиенитовый (Гусев, 2013). U-Pb датирование по циркону (SHRIMP II) главных петрографических разновидностей комплексов показало, что возраст аляскитовых гранитов –  $1984 \pm 16$  млн лет и  $1969 \pm 7$  млн лет, лейкогранитов –  $1952 \pm 10$  млн лет, пегматоидных плагиогранитов –  $1970 \pm 16$  млн лет, пегматоидных калиевых гранитов и пегматитов –  $1954 \pm 12$  и  $1960 \pm 12$  млн лет (маганский комплекс, Государственная..., 2016); возраст кварцевых монзонитов –  $2007 \pm 13$  млн лет, порфириовидных кварцевых монцодиоритов  $1985 \pm 13$ ,  $1983 \pm 9$  и  $1985 \pm 24$  млн лет (билляхский комплекс, Гусев, 2013).

Минимальный возраст обломочного циркона изученного образца песчаника лабазтахской свиты мукунской серии ~1890 млн лет, но предпола-

гая формирование отложений этой серии в изученном регионе не ранее 1680 млн лет назад на основе корреляции с разрезом на западе Анабарского щита (Khudoley et al., 2015), это может свидетельствовать об отсутствии синседиментационной магматической активности, что характерно для зоны стабильного развития, например, пассивной окраины или внутрикратонного бассейна (Cawood et al., 2012). Исходя из того факта, что в исследовании обломочных цирконов по профилю через весь Анабарский щит (Raquette et al., 2017) возрасты моложе 1.7 млрд лет не встречаются, можно предположить, что нижняя часть разреза мукунской серии Западно-Анабарского бассейна имела отличные от ее верхней части и Восточно-Анабарского бассейна питающие провинции. Такими провинциями могли выступать интрузивные массивы, расположенные к север-северо-западу от Анабарского щита, на данный момент перекрытые венд-кембрийскими породами осадочного чехла (Купцова и др., 2015). Это может быть объяснением большей мощности разрезов Западно-Анабарского бассейна по сравнению с Восточно-Анабарским.

Кроме того, картина распределения возрастов обломочных цирконов, полученная как в ходе настоящего исследования, так и в работах предшественников (Khudoley et al., 2015; Raquette et al., 2017), не подтверждает в пределах Восточно-Анабарского бассейна присутствия магматического события раннемукунского времени, с которым Б.Р. Шпунт и ряд других исследователей связывают наличие эффузивных пород и пирокластического материала в составе лабазтахской свиты на территории Западно-Анабарского бассейна (Духанин, Эрлих, 1967; Шпунт и др., 1982; см. также ссылки в этой работе).

В этой связи для пород лабазтахской свиты восточной части Анабарского щита можно предположить следующую историю формирования: в непосредственной близости от источника сноса в бассейн седиментации поступал терригенный, преимущественно полевошпатовый материал, который постепенно сменялся кварцевой составляющей. Возрастание минералогической зрелости вверх по разрезу сопровождающееся сменой тектонических обстановок с поднятия фундамента на внутрикратонную область и размыв континентального блока (см. рис. 11, Dickinson, 1985) говорит, скорее всего, о смене состава пород в источнике сноса с интрузивных комплексов на осадочные породы. На вероятный последующий рециклинг более древних терригенных пород указывает расположение точек на диаграмме Zr/Sc–Th/Sc (см. рис. 7г) и хорошая окатанность обломочных зерен циркона и кварца в изученных пробах песчаников. Однако угловатые зерна полевых шпатов и характерные для известных магматических и метаморфических комплексов Анабарского щита (Гусев, 2013) пики воз-

растов на KDE-диаграмме (см. рис. 9б) свидетельствуют о размыве местных источников сноса. При этом песчаники накапливались в условиях периодически осушаемого мелководья, о чем свидетельствуют симметричные знаки ряби волнения и локальные трещины усыхания.

Таким образом, питающая провинция представляла собой древний континентальный блок с выведенными на поверхность плутоническими породами гранитного состава с повышенной щелочностью, о чем свидетельствует широкое распространение КППШ в обломочной фракции песчаников. На более поздних этапах в область размыва, вероятно, попали и накопившиеся ранее терригенные породы. Терригенные отложения лабазтахской свиты формировались во внутриплитном мелководном приемном бассейне либо в отдельном просторанстве accommodation в пределах континентальной части пассивной окраины.

## ВЫВОДЫ

Изученные породы характеризуются отсутствием натрий-кальциевых плагиоклазов. В качестве породообразующих минералов выступают кварц и сильно разложенные КППШ.

Доминирование полевых шпатов над кварцем в части образцов, преобладающая плохая окатанность терригенных полевошпатовых зерен во всех изученных образцах говорят о коротких путях миграции и близком расположении питающих провинций к зоне аккумуляции, зерна алевритовой размерности – о слабой гидродинамике, а знаки ряби волнения, наблюдаемые в обнажениях, – о мелководной обстановке седиментации. С другой стороны, хорошая окатанность кварца и циркона свидетельствуют о наличии и удаленной питающей провинции.

Аккумуляция терригенного материала на юго-востоке Анабарского щита происходила в относительно стабильной тектонической обстановке при размыве континентального блока (Dickinson, 1985).

Проведенная реконструкция может быть прямо сопоставлена с выполненным ранее восстановлением источников сноса востока Анабарского щита (Khudoley et al., 2015). Более молодая датировка обломочного циркона мукунской серии на северо-западе ( $1681 \pm 21$  млн лет, Khudoley et al., 2015) свидетельствует о наличии ещё одного источника сноса для Западно-Анабарского бассейна.

В образовании изученных лабазтахских песчаников принимали участие преимущественно кислые плутонические породы повышенной щелочности и в меньшей степени – метаморфические комплексы щелочнополевошпатового состава. Вероятно, имел место и рециклинг более древних терригенных пород. В пределах изученной площади источниками обломочного циркона могут быть маг-

матические породы кислого состава анабарско-го эндрбит-чарнокит-мигматитового (возрастные кластеры циркона ~2750 и ~2890 млн лет на рис. 9), маганского аляскит-лейкогранит-мигматитового и билляхского гранодиорит-гранит-граносиенитового (~1965 млн лет) комплексов, а также метаморфические породы – гранулиты и гранитизированные породы с возрастом ~2.0–1.8 млрд лет Маганского и Далдынского террейнов и раннепротерозойские толщи в пределах Хапчанского пояса (Государственная..., 2016).

#### Благодарности

Мы благодарны А.К. Худолею за рекомендации по составлению и оформлению научной статьи, а также Б.В. Беляцкому, Н.В. Платоновой, К.Ю. Васильевой и О.Ю. Лебедевой за помощь при геохронологических, рентгенофазовых и петрографических исследованиях. Авторы выражают признательность С.П. Нилову и М.В. Никитиной за предоставленную возможность обработки каменного материала на территории Научного Парка СПбГУ, а также двум анонимным рецензентам за ценные замечания к работе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Веселовский Р.В., Павлов В.Э., Петров П.Ю. (2009) Новые палеомагнитные данные по Анабарскому поднятию и Учуро-Майскому району и их значение для палеогеографии и геологической корреляции рифея Сибирской платформы. *Физика Земли*, (7), 3-24. <https://doi.org/10.1134/S0002333709070011>
- Горохов И.М., Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Васильева И.М., Ризванова Н.Г., Липенков Г.В., Дубинина Е.О. (2019) Раннерифейская билляхская серия Анабарского поднятия, Северная Сибирь: изотопная С-О геохимия и Rb-Pb возраст доломитов. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, 27(5), 19-35.
- Горохов И.М., Семихатов М.А., Друбецкой Е.Р., Ивановская Т.А., Кутявин Э.П., Мельников Н.Н., Турченко Т.Л., Ципурский С.И., Яковлева О.В. (1991) Rb-Sr и K-Ar возраст осадочных геохронометров нижнего рифея Анабарского массива. *Изв. АН СССР: Сер. геол.*, (7), 17-32.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации (Г.В. Липенков, М.С. Машак, В.Т. Кириченко, А.И. Ларичев и др.). (2015) Масштаб 1 : 1 000 000. Анабаро-Виллюйская сер., лист R-48. СПб.: ВСЕГЕИ.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации (Н.И. Гусев, М.Г. Пушкин). (2016) Масштаб 1 : 1 000 000. Анабаро-Виллюйская сер., лист R-49. СПб.: ВСЕГЕИ.
- Государственная геологическая карта СССР (Б.Г. Лопатин, С.М. Табунов). (1965) Масштаб 1 : 200 000. Анабарская сер., листы R-49-XXIII, XXIV. М.: Главное управление геодезии и картографии Государственного геологического комитета СССР.
- Гусев Н.И. (2013) Анабарский щит Сибирского кратона. Вещественный состав, геохимия, геохронология. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 189 с.
- Духанин С.Ф., Эрлих Э. (1967) Государственная геологическая карта СССР. Объясн. записка. Анабарская сер., листы R-49-XXVII, XVIII. М.: Недра, 47 с.
- Зайцева Т.С., Семихатов М.А., Горохов И.М., Сергеев В.Н., Кузнецов А.Б., Ивановская Т.А., Мельников Н.Н., Константинова Г.В. (2016) Изотопная геохронология и биостратиграфия рифейских отложений Анабарского массива, Северная Сибирь. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, 24(6), 3-29. <https://doi.org/10.7868/S0869592X16050069>
- Злобин М.Н., Кабаньков В.Я. (1970) Литологическая характеристика верхнедокембрийских отложений Западного склона Анабарского поднятия. Опорный разрез верхнедокембрийских отложений западного склона Анабарского поднятия. Л.: НИИГА, 21-55.
- Комар В.А. (1966) Строматолиты верхнедокембрийских отложений севера Сибирской платформы и их стратиграфическое значение. М.: Наука, 114 с.
- Константиновский А.А. (2000) Палеороссыпи в эволюции осадочной оболочки континентов. М.: Научный мир, 288 с.
- Купцова А.В. (2012) Особенности строения и эволюция рифейских ураноносных бассейнов: Пашско-Ладжского, Восточно-Анабарского и Атабаска. Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. СПб.: СПбГУ, 160 с.
- Купцова А.В., Худoley А.К., Дэвис В., Рейнбирд Р.Х., Молчанов А.В. (2015) Результаты U-Pb датирования обломочных цирконов из верхнепротерозойских отложений восточного склона Анабарского поднятия. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, 23(3), 13-29.
- Купцова А.В., Худoley А.К., Молчанов А.В. (2011) Литогеохимия верхнепротерозойских терригенных отложений южной части Восточно-Анабарского бассейна: эволюция состава источников сноса и вторичные изменения. *Вестник СПбГУ*, 7(1), 17-31.
- Лопатин Б.Г. (1972) Государственная геологическая карта СССР. Объясн. записка. Анабарская сер., листы R-49-XV, XVI. М.: Недра, 82 с.
- Лопатин Б.Г., Табунов С.М. (1969) Государственная геологическая карта СССР. Объясн. записка. Анабарская сер., листы R-49-XXIII, XXIV. М.: Недра, 40 с.
- Петров П.Ю. (2011) Фациальная характеристика и особенности терригенной седиментации мукунской серии (нижний рифей Анабарского поднятия Сибири). *Литология и полез. ископаемые*, (2), 185-208.
- Петтиджон Ф., Поттер П., Сивер Р. (1976) Пески и песчаники. М.: Мир, 535 с.
- Розен О.М., Журавлев Д.З., Суханов М.К. и др. (2000) Изотопно-геохимические и возрастные характеристики раннепротерозойских террейнов, коллизионных зон и связанных с ними аноксигенов на северо-востоке Сибирского кратона. *Геология и геофизика*, 41(2), 163-179.
- Савицкий, В.Е., Демюкидов, К.К., Соболевская, Р.Ф., Кабаньков, В.Я., Лазаренко, Н.П. (1959) Стратиграфия синийских и кембрийских отложений северо-востока Сибирской платформы. *Труды научн.-иссл. ин-та геол. Арктики*, 101.
- Сергеева Л.Ю. (2021) Состав и изотопно-геохимическая характеристика циркона из гранулитов далдынской серии Анабарского щита. Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. СПб.: Санкт-Петербургский горный ун-т, 183 с.
- Шванов В.Н. (1987) Петрография песчаных пород (компонентный состав, систематика и описание минеральных видов). Л.: Недра, 269 с.

- Шпунт Б.Р., Шаповалова И.Г., Шамшина Э.А. (1982) Поздний докембрий севера Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 225 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2000) Основы литохимии. СПб.: Наука, 479 с.
- Cawood P.A., Hawkesworth C.J., Dhuime B. (2012) Detrital zircon record and tectonic setting. *Geology*, **40**(10), 875-878. <https://doi.org/10.1130/G32945.1>
- Corfu F., Hanchar J.M., Hoskin P.-W.O., Kinny P. (2003) Atlas of zircon textures. *Reviews in Mineral. Geochem.*, **53**(1), 469-500. <https://doi.org/10.2113/0530469>
- Dickinson W.R. (1985) Provenance of arenites. (Ed. by G.G. Zuffa). *NATO ASI Series, Series C, Mathematical and Physical Sciences*, 148, 333-361.
- Ernst R.E., Buchan K.L., Hamilton M.A., Okrugin A.V., Tomshin M. (2000) Integrated Paleomagnetism and U-Pb Geochronology of Mafic Dikes of the Eastern Anabar Shield Region, Siberia: Implications for Mesoproterozoic Paleolatitude of Siberia and Comparison with Laurentia. *J. Geology*, **108**, 381-401. <https://doi.org/10.1086/314413>.
- Ernst R.E., Hamilton M.A., Söderlund U., Hanes J.A., Gladkochub D.P., Okrugin A.V., Kolotilina T., Mekhonoshin A.S., Bleeker W., LeCheminant A.N., Buchan K.L., Chamberlain K.R., Didenko A.N. (2016) Southern Siberia and northern Laurentia: Neighbours for a quarter of Earth's history. *Nature Geosciences*, **9**(6), 464-469.
- Gehrels G. (2012) Detrital zircon U-Pb geochronology: Current methods and new opportunities. *Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances*, (2), 47-62. <https://doi.org/10.1002/9781444347166.ch2>
- Khudoley A., Chamberlain K., Ershova V., Sears J., Prokopiev A., MacLean J., Kazakova G., Malyshev S., Molchanov A., Kullerud K., Toro J., Miller E., Veselovskiy R., Li A., Chipley D. (2015) Proterozoic supercontinental restorations: Constraints from provenance studies of Mesoproterozoic to Cambrian clastic rocks, eastern Siberian Craton. *Precambrian Res.*, **259**, 78-94. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.10.003>
- McLennan S.M., Hemming S., McDaniel D.K., Hanson G.N. (1993) Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. *Geol. Soc. Amer.*, **284**, 21-40.
- Paquette J.L., Ionov D.A., Agashev A.M., Gannoun A., Nikolenko E.I. (2017) Age, provenance and Precambrian evolution of the Anabar shield from U-Pb and Lu-Hf isotope data on detrital zircons, and the history of the northern and central Siberian craton. *Precambrian Res.*, **301**, 134-144. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.09.008>
- Pasenko A.M., Malyshev S.V., Pazukhina A.A., Savelev A.D., Lipenkov G.V., Chamberlain K.R. (2023) Age, Composition, and Paleomagnetism of Dolerite-Gabbro Dolerite Intrusions of the Western Slope of the Anabar Massif: The Issue of Vendian Magmatism in the Region. *Dokl. Earth Sci.*, (6). <https://doi.org/10.1134/S1028334X2360278X>
- Rodionov N.V., Belyatsky B.V., Antonov A.V., Kapitonov I.N., Sergeev S.A. (2012) Comparative in-situ U-Th-Pb geochronology and trace element composition of baddeleyite and low-U zircon from carbonates of the Palaeozoic Kovdor alkaline-ultramafic complex, Kola Peninsula, Russia. *Gondwana Res.*, **21**(4), 728-744.
- Taylor S.R., McLennan S.M. (1985) The Continental Crust: Its composition and evolution. London: Blackwell Scientific Publications, 312 p.
- Ulmer-Scholle Dana S., Scholle Peter A., Schieber Juergen, Raine Robert J.A. (2014) Color Guide to the Petrography of Sandstones, Siltstones, Shales and Associated Rocks. *Amer. Assoc. Petrol. Geolog.*, **109**, 544 p. <https://doi.org/10.1306/M1091304>
- Vermeesch P. (2018) IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology. *Geosci. Frontiers*, **9**(5), 1479-1493. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.001>.
- Warr Laurence N. (2021) IMA-CNMNC approved mineral symbols. *Mineral. Magaz.*, **85**, 291-320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>

## REFERENCES

- Cawood P.A., Hawkesworth C.J., Dhuime B. (2012) Detrital zircon record and tectonic setting. *Geology*, **40**(10), 875-878. <https://doi.org/10.1130/G32945.1>
- Corfu F., Hanchar J.M., Hoskin P.-W.O., Kinny P. (2003) Atlas of zircon textures. *Reviews in Mineral. Geochem.*, **53**(1), 469-500. <https://doi.org/10.2113/0530469>
- Dickinson W.R. (1985) Provenance of arenites. (Ed. by G.G. Zuffa). *NATO ASI Series, Series C, Mathematical and Physical Sciences*, **148**, 333-361.
- Dukhanin S.F., Erlikh E. (1967) State Geological Map of the USSR. An explanatory note. Anabar series, sheets R-49-XVII, XVIII. Moscow, Nedra Publ., 47 p. (In Russ.)
- Ernst R.E., Buchan K.L., Hamilton M.A., Okrugin A.V., Tomshin M. (2000) Integrated Paleomagnetism and U-Pb Geochronology of Mafic Dikes of the Eastern Anabar Shield Region, Siberia: Implications for Mesoproterozoic Paleolatitude of Siberia and Comparison with Laurentia. *J. Geology*, **108**, 381-401. [10.1086/314413](https://doi.org/10.1086/314413).
- Ernst R.E., Hamilton M.A., Söderlund U., Hanes J.A., Gladkochub D.P., Okrugin A.V., Kolotilina T., Mekhonoshin A.S., Bleeker W., LeCheminant A.N., Buchan K.L., Chamberlain K.R., Didenko A.N. (2016) Southern Siberia and northern Laurentia: neighbours for a quarter of Earth's history. *Nature Geosci.*, **9**(6), 464-469.
- Gehrels G. (2012) Detrital zircon U-Pb geochronology: Current methods and new opportunities. *Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances*, (2), 47-62. <https://doi.org/10.1002/9781444347166.ch2>
- Gorokhov I.M., Kuznetsov A.B., Semikhatov M.A., Vasilyeva I.M., Rizvanova N.G., Lipenkov G.V., Dubinina E.O. (2019) Early riphean Bbillyakh Ggroup of the Anabar Uplift, Northern Siberia: C-O isotope geochemistry and Pb-Pb age of dolomites. *Stratigraphyia. Geol. Correlatsiya*, **27**(5), 19-35. (In Russ.)
- Gorokhov I.M., Semikhatov M.A., Drubetskoy E.R., Ivanovskaya T.A., Kut'yavin E.P., Melnikov N.N., Turchenko T.L., Tsipursky S.I., Yakovleva O.V. (1991) Rb-Sr and K-Ar age of Lower Riphean sedimentary geochronometers of the Anabar massif. *Izvestiya AN SSSR, Ser. geol.*, (7), 17-32. (In Russ.)
- Gusev N.I. (2013) Anabar Shield of the Siberian Craton. Material composition, geochemistry, geochronology. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 189 p. (In Russ.)
- Khudoley A., Chamberlain K., Ershova V., Sears J., Prokopiev A., MacLean J., Kazakova G., Malyshev S., Molchanov A., Kullerud K., Toro J., Miller E., Veselovskiy R., Li A., Chipley D. (2015) Proterozoic superconti-

- mental restorations: constraints from provenance studies of Mesoproterozoic to Cambrian clastic rocks, eastern Siberian Craton. *Precambrian Res.*, **259**, 78-94. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.10.003>
- Komar V.A. (1966) Stromatolites of the Upper Precambrian deposits of the northern Siberian platform and their stratigraphic significance. Moscow, Nauka, 114 p. (In Russ.)
- Konstantinovsky A.A. (2000) Paleoplacers in the evolution of the sedimentary shell of the continents. Moscow, Nauchnyy mir, 288 p. (In Russ.)
- Kuptsova A.V. (2012) Features of the structure and evolution of the Riphean uranium-bearing basins: Pashko-Ladoga, East Anabar and Athabasca. Cand. geol. and min. sci. diss. St.Petersburg, SPbSU, 160 p. (In Russ.)
- Kuptsova A.V., Khudoley A.K., Davis V., Rainbird R.H., Molchanov A.V. (2015) Results of U-Pb dating of detrital zircons from Upper Proterozoic deposits of the eastern slope of the Anabar Uplift. *Stratigraphyia. Geol. Correlatsiya*, **23**(3), 13-29. (In Russ.)
- Kuptsova A.V., Khudoley A.K., Molchanov A.V. (2011) Lithochemistry of Upper Proterozoic terrigenous deposits of the southern part of the East Anabar Basin: Evolution of the composition of sources of demolition and secondary changes. *Vestnik SPbGU*, **7**(1), 17-31. (In Russ.)
- Lopatin B.G. (1972) State Geological Map of the USSR: An explanatory note. Anabar series, sheets R-49-XV, XVI. Moscow, Nedra Publ., 82 p. (In Russ.)
- Lopatin B.G., Tabunov S.M. (1969) State Geological Map of the USSR: An explanatory note. Anabar series, sheets R-49-XXIII, XXIV. Moscow, Nedra Publ., 40 p. (In Russ.)
- McLennan S.M., Hemming S., McDaniel D.K., Hanson G.N. (1993) Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. *Geol. Soc. Amer.*, **284**, 21-40.
- Paquette J.L., Ionov D.A., Agashev A.M., Gannoun A., Nikolenko E.I. (2017) Age, provenance and Precambrian evolution of the Anabar shield from U-Pb and Lu-Hf isotope data on detrital zircons, and the history of the northern and central Siberian craton. *Precambrian Res.*, **301**, 134-144. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.09.008>
- Pasenko A.M., Malyshev S.V., Pazukhina A.A., Saveliev A.D., Lipenkov G.V., Chamberlain K.R. (2023) Age, Composition, and Paleomagnetism of Dolerite–Gabbro Dolerite Intrusions of the Western Slope of the Anabar Massif: The Issue of Vendian Magmatism in the Region. *Dokl. Earth Sci.*, (6). <https://doi.org/10.1134/S1028334X2360278X>
- Petrov P.Yu. (2011) Facies characteristics and features of terrigenous sedimentation of the Mukun Group (Lower Riphean of the Anabar uplift of Siberia). *Litologiya i Polez. Iskopaemye*, (2), 185-208. (In Russ.)
- Pettijohn F., Potter P., Seaver R. (1976) Sands and Sandstones. Moscow, Mir Publ., 535 p. (In Russ.)
- Rosen O.M., Zhuravlev D.Z., Sukhanov M.K., et al. (2000) Isotope-geochemical and age characteristics of Early Proterozoic terranes, collision zones, and associated anorthosites in the northeastern Siberian Craton. *Geol. Geofiz.*, **41**(2), 163-179. (In Russ.)
- Savitsky V.E., Demokidov K.K., Sobolevskaya R.F., Kabanov V.Ya., Lazarenko N.P. (1959) Stratigraphy of the Sinic and Cambrian deposits of the northeastern Siberian platform. *Trudy nauchn.-issl. in-ta geol. Arktiki*, 101. (In Russ.)
- Sergeeva L.Yu. (2021) Composition and isotope-geochemical characteristics of zircon from granulites of the Daldyn Ggroup of the Anabar Shield. Cand. geol. and min. sci. diss. St.Petersburg, St. Petersburg Mining University, 183 p. (In Russ.)
- Shpunt B.R., Shapovalova I.G., Shamshina E.A. (1982) Late Precambrian of the northern Siberian platform. Novosibirsk, Nauka, 225 p. (In Russ.)
- Shvanov V.N. (1987) Petrography of sand rocks (component composition, systematics and description of mineral species. Leningrad, Nedra Publ., 269 p. (In Russ.)
- State Geological Map of the Russian Federation (G.V. Lipenkov, M.S. Maschak, V.T. Kirichenko, A.I. Larichev et al.). (2015) Masshtab 1 : 1 000 000. Anabaro-Vilyuy series, sheet R-48. St.Petersburg, VSEGEI. (In Russ.)
- State Geological Map of the Russian Federation (N.I. Gusev, M.G. Pushkin). (2016) Masshtab 1 : 1 000 000. Anabaro-Vilyuy series, sheet R-49. St.Petersburg, VSEGEI. (In Russ.)
- State Geological Map of the USSR (B.G. Lopatin, S.M. Tabunov). (1965) Masshtab 1 : 200 000. Anabar series, sheets R-49-XXIII, XXIV. Moscow, Main Directorate of Geodesy and Cartography of the State Geological Committee of the USSR. (In Russ.)
- Taylor S.R., McLennan S.M. (1985) The Continental Crust: Its composition and evolution. London, Blackwell Scientific Publications, 312 p.
- Ulmer-Scholle Dana S., Scholle Peter A., Schieber Juergen, Raine Robert J.A. (2014) Color Guide to the Petrography of Sandstones, Siltstones, Shales and Associated Rocks. *Amer. Assoc. Petrol. Geolog.*, **109**, 544 p. <https://doi.org/10.1306/M1091304>
- Vermeesch P. (2018) IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology. *Geosci. Frontiers*, **9**(5), 1479-1493. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.001>
- Veselovsky R.V., Pavlov V.E., Petrov P.Yu. (2009) New paleomagnetic data on the Anabar uplift and Uchur-Maisky region and their significance for the paleogeography and geological correlation of the Riphean of the Siberian platform. *Fizika Zemli*, (7), 3-24. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0002333709070011>
- Warr Laurence N. (2021) IMA-CNMNC approved mineral symbols. *Mineral. Magaz.*, (85), 291-320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2000) Fundamentals of lithochemistry. St.Petersburg, Nauka Publ., 479 p. (In Russ.)