

Санкт-Петербургский государственный университет

КАРПИНЧИК Глеб Олегович

Выпускная квалификационная работа

***Нижнерифейские песчаники мукунской серии (юго-восток Анабара):
состав и реконструкция источников сноса***

Уровень образования: бакалавриат

Направление: 05.03.01 - «Геология»

Основная образовательная программа: СВ.5018.2019

«Региональная геология»

Научный руководитель:

Профессор кафедры региональной
геологии Института наук о Земле СПбГУ,
докт. геол.-мин. н.,
А. К. Худолей

Рецензент:

Ведущий геолог ФГБУ «ВСЕГЕИ»,
М. А. Калинин

Санкт-Петербург

2023

Оглавление

Оглавление	1
Введение	2
1. Общие сведения об объекте работ	5
1.1 Географический очерк	5
1.2 Геологическая изученность Анабарского массива	8
1.3 Геологическое строение Анабарского массива	9
2. Очерк геологического строения рифей-вендского обрамления Анабарского массива	16
2.1 Состав и строение разреза нижней части докембрийского чехла	16
2.2 Состав и строение разреза средней и верхней частей докембрийского чехла	19
3. Методика исследования и объём работ	20
3.1 Методика проведения полевых исследований	20
3.2 Методика обработки каменного материала и проведения экспериментальных исследований	23
4. Результаты исследований	27
4.1 Результаты рентгенофазового анализа	27
4.2 Факторный анализ: ассоциации минералов в песчаниках и их интерпретация	31
4.3 Результаты микроскопического изучения шлифов и рентгеноспектрального микроанализа	37
4.4 Результаты изотопных исследований	46
Обсуждение результатов и выводы	48
Список литературы	52
ПРИЛОЖЕНИЯ	56

Введение

Центральная часть Анабарского массива сложена глубокометаморфизованными архейскими и нижнепротерозойскими породами, которые по периферии перекрыты рифей-палеозойским осадочным чехлом. Платформенный разрез начинают нижнерифейские песчаники мукунской серии. Предположения об источниках сноса мукунских песчаников базируются на широко распространенных представлениях о небольших поднятиях в пределах Анабарского массива, существовавших к началу рифейского осадконакопления. **Актуальность** работы определяется тем, что существуют лишь отрывочные данные по возрасту, петрографическому и химическому составу мукунской серии. Геохронологические и геохимические исследования, полученные современными методами, редки (Государственная..., 2016; Smelov, Timofeev, 2007).

Цель бакалаврской работы заключается в реконструкции источников сноса песчаников мукунской серии, основанной на определении минерального и химического состава песчаников, а также анализе U-Pb возрастов обломочных цирконов. Для достижения этой цели в ходе полевых работ на юго-восточном склоне Анабарского массива автором было отобрано 25 проб песчаников. Были опробованы коренные выходы пород в руслах р. Большая Куонамка (22 образца) и ручья Дюсун (3 образца), расположенного в 9 км южнее р. Б. Куонамка.

Таким образом, **объектом исследования** являются отобранные с реки Большая Куонамка и ручья Дюсун образцы песчаников лабазтахской свиты в составе мукунской серии, а **предметом** - их минеральный и химический состав, а также U-Pb возраст обломочных цирконов.

В соответствии с целью было предложено решить следующие **задачи**:

1. Изучить имеющуюся литературу по геологии Анабарского массива и его склонов;
2. Изучить химический состав песчаников;
3. Изучить минеральный состав песчаников;
4. Изучить состав и соотношение обломочных минералов тяжелой и легкой фракций песчаников;
5. Определить возрастную принадлежность минералов песчаников для выявления возраста возможных источников сноса;
6. Выявить возможные источники сноса.

Методика исследования. При написании бакалаврской работы был использован ряд методов. Основополагающим подходом к изучению минерального и химического состава песчаников являлся качественный и количественный рентгенофазовый анализ. При

этом отдельно рассматривались легкая и тяжелая фракции, которые разделялись с помощью гравитационного стола и бромформа после предварительного дробления образцов. Для исследования структурно-текстурных особенностей, распределения различных компонентов в составе песчаников, акцессорных минералов проводилось петрографическое изучение шлифов в совокупности с рентгеноспектральным микроанализом. Изотопные исследования детритовых цирконов осуществлялись в ЦИИ ВСЕГЕИ методом SHRIMP. За исключением определения возраста обломочных цирконов, в остальных исследованиях автор принимал участие на всех этапах, от отбора образцов и их пробоподготовки до финальной интерпретации результатов.

Значимость работы. Практическая значимость работы заключается в детальном описании пород нижней части осадочного чехла и их взаимоотношений с фундаментом с применением новейших данных, которые будут использоваться в работах по ГДП Анабарской партией отдела региональной геологии и полезных ископаемых севера Сибири Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского. В пределах Анабарского массива вдоль реки Куонамки выявлены золото-кварц-малосульфидное и золото-платиноидное докембрийские рудопроявления (Герасимов и др., 2014). Помимо этого, лабазтахские песчаники непосредственно залегают на породы фундамента и могут являться потенциальным местом накопления урана (Купцова и др., 2012; Молчанов и др., 2001). Таким образом, изучение источников сноса поможет лучше понять возможное расположение золоторудных оруденений не только на обнаженном массиве, но и на территории, перекрытой песчаниками, а с помощью петрографических характеристик можно рассмотреть положительные и отрицательные факторы для формирования урановых месторождений типа несогласия.

Научная значимость работы заключается в реконструкции палеогеографии и изучении распределения минеральных особенностей по разрезу мукунской серии, что поможет лучше понять эволюцию Восточно-Анабарского бассейна и сравнить его с Западно-Анабарским.

Результаты работы были также представлены на геологической международной студенческой конференции (GISS), проводимой Санкт-Петербургским государственным университетом в 2023 году.

Структура бакалаврской работы. Бакалаврская работа состоит из введения, 4 глав, обсуждения результатов и выводов, приложений и списка использованной литературы.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю Андрею Константиновичу Худолею за многочисленные консультации, помощь как в написании и

оформлении бакалаврской работы, так и в оперативном предоставлении необходимых литературных и вещественных материалов

Автор благодарит Александра Дмитриевича Савельева за помощь в отборе материалов к бакалаврской работе, а также советы и рекомендации в интерпретации полученных данных.

Автор также выражает глубокую признательность Ирине Клавдиевне Котовой за ценные советы при обработке привезенного каменного материала и колоссальную помощь в проведении факторного анализа, а также интерпретации полученных данных и рекомендаций по оформлению курсовой работы. Кроме того, автору хотелось бы выразить искреннюю признательность Наталье Владимировне Платоновой за помощь в проведении рентгенофазового анализа, Сергею Петровичу Нилову и Марии Владимировне Никитиной за содействие в обработке исходного каменного материала, Ксении Юрьевне Васильевой и Ольге Юрьевне Лебедевой за предложения по оформлению графического материала и помощь в проведении петрографического исследования шлифов, а также Елене Евгеньевне Серее и Александру Николаевичу Ларионову за предоставление изотопных данных по обломочным цирконам из отобранных образцов. Каменный материал дробился и измельчался в лаборатории пробоподготовки Института Наук о Земле с дальнейшим проведением количественного и качественного рентгенофазового анализа в РЦ «Рентгенодифракционные методы исследования» и рентгеноспектрального микроанализа в РЦ ««Микроскопии и микроанализа» Научного парка СПбГУ.

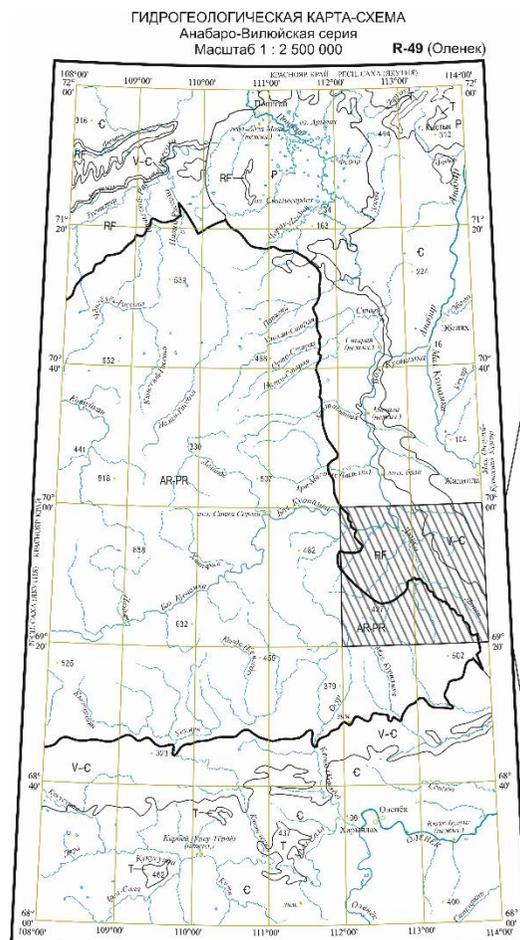
1. Общие сведения об объекте работ

1.1 Географический очерк

Район работ находится на территории Оленекского района (улуса) Республики Саха (Якутия). Традиционным перевалочным пунктом из Якутска до участка работ является село Саскылах. Основу экономики Саскылаха, а также других близких к нему улусов составляют сельское хозяйство (оленоводство и звероводство) и охотничий промысел. В районе имеются совхозы, крестьянские хозяйства, в том числе общинно-родовые. Транспортная связь с Якутском - воздушная и по автозимникам. Южнее села находится взлётно-посадочная полоса. Железных дорог нет. Таким образом, перевозка грузов и персонала к месту проведения полевых работ и обратно в настоящее время осуществляется преимущественно воздушным способом, а также с помощью судов на воздушной подушке.

В рельефе массиву отвечает Анабарское плато с высотами до 905 м. До 450 м характерно развитие редкостойных лиственничных лесов, выше - горная тундра. На плато берут начало следующие реки: Анабар, Котуйкан и Большая Куонамка (участок работ 2022 г.). Плато сильно расчленено речными долинами со следами древнего оледенения. Поднятия в пределах Анабарского массива характеризуются платообразными вершинами. Повсюду распространены скальные выходы разнообразного состава, глыбовые развалы, курумники и осыпи. Характерна высотная поясность. Непосредственно на участке работ 2022 года высоты составляют 100-500 м над уровнем моря (рис. 1.1). Местность равнинная, местами холмистая, сильно заболоченная и задернованная, с широким развитием глубоких топей, по периферии которых преобладает тяжело проходимая карликовая березка и кустарники. На вершинах развита густая ольха, окруженная курумами. Территорию работ слабо пересекают ручьи, источником воды в основном являются локальные замкнутые водоемы либо крупные реки (рис. 1.1). Межгорные котловины Анабарского плато выполнены аллювиальными валунными, галечными и песчаными отложениями. Климат резко континентальный, с переходом к субарктическому, с крайне суровыми, продолжительными зимами и прохладным, дождливым летом.

Территория относится к зоне распространения вечной мерзлоты. Плато расположено в континентальной области субарктического пояса и характеризуется очень низкой нормой осадков - около 250 мм в год. Среднегодовая температура составляет около -14°C , средняя температура января составляет -34°C с абсолютным минимумом до -60°C , период с отрицательными среднесуточными температурами длится около 260 дней. Лето дождливое, июль часто жаркий с максимальной температурой до $+38^{\circ}\text{C}$, нередко сопровождающийся грозами и ливнями.



Масштаб 1 : 200 000
Сплошные горизонтали проведены через 20 м

Условные обозначения

- Точки наблюдения в коренных выходах
- ⊙ Точки наблюдения в элювиальных выходах
- ⊕ Точки наблюдения в перемещенных отложениях
- Точки наблюдения в рыхлых отложениях
- Линия маршрута

Рис. 1.1. Слева - гидрогеологическая карта-схема Анабаро-Вилуйской серии масштаба 1:2 500 000 (на основе Государственная..., 2016), справа - карта фактического материала масштаба 1:200 000 2022 года (без врезок). Составила Александрова Е. Д. Красным закрашены участки работ с участием автора.

На территории обитают следующие виды животных: лось, северный олень, волк, бурый медведь, полевка, бурундук, а также животные с ценным мехом, такие как рыжая лисица, песец, соболь, горноста́й и др. В речных и озёрных водоёмах насчитывается около 50 видов рыб, преобладающими из которых являются лососевые и сиговые. На территории гнездятся более 250 видов птиц, наиболее часто встречающиеся - куропатка и чайка. Основными лесообразующими породами являются лиственница Гмелина, сосна обыкновенная, ель сибирская, сибирский кедр, карликовая берёза. Из древесных растений, имеющих второстепенное значение, встречается пихта, ольха, ель. Леса густые с обилием кустарников с подлёсками: смородина, шиповник, - ягодами: голубика, морошка, - и грибами: подберезовики, сыроежки, маслята.

1.2 Геологическая изученность Анабарского массива

Открытие Анабарского массива приходится на начало XX века, когда О. О. Баклунд, участник Хатангской экспедицией Русского географического общества, пересёк массив и классифицировал слагающие его породы (Сидоренко и др., 1970). Первое расчленение метаморфического комплекса пород по петрографическому составу было предложено Б. Н. Рожковым, Г. Г. Моором и Б. В. Ткаченко в тридцатых годах прошлого столетия. Детальные съёмки и комплексные изучения начались в поствоенное время рядом исследователей НИИГА. Расчленение архейских пород, которое остаётся актуальным и в настоящий момент, произведено М. И. Рабкиным в 1959 г. Основная информация о фундаменте массива представлена в трудах В. С. Оксмана, О. М. Розена, А. П. Смелова. Главные сведения, затрагивающие строение чехла, подробно излагаются в объяснительных записках к государственным геологическим картам СССР масштаба 1:200000 и 1:1000000. В настоящее время работы на территории Анабарского массива ведутся государственными геологическими партиями (ВСЕГЕИ, ИГРИ-РГГРУ), а также частными производственными предприятиями: Алмазы Анабара (АК АЛРОСА) и др.

Состав и стратиграфия рифейских отложений изучались в ходе различных геологических съёмок, а также палеонтологических и изотопных исследований во второй половине XX века рядом исследователей: В. Н. Сергеевым, Н. Г. Воробьёвым, П. Ю. Петровым, И. М. Гороховым, М. А. Семихатовым, Е. Р. Друбецкой и др. Изотопные датировки для осадочных, а также интрузивных ранне-позднепротерозойских комплексов проводились А. К. Худолеем, А. В. Купцовой, Р. В. Веселовским, Р. Эрнстом (Ernst), И. М. Гороховым, Д. П. Гладкочубом и другими (Веселовский и др., 2009; Khudoley et al., 2015; Купцова и др., 2015; Ernst et al., 2000, 2016; Горохов и др. 2019; Gladkochub et al., 2022). В настоящее время в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ планируется датирование обломочных апатитов и рутилов, что позволит более точно ограничить возраст накопления толщи и определить возможные источники сноса.

1.3 Геологическое строение Анабарского массива

Материал для бакалаврской работы собирался в ходе полевых работ, проходивших в составе Анабарской партии ВСЕГЕИ в период 17.06.22-30.08.22. Полевые исследования велись на юго-восточной части Анабарского массива (рис. 1.2).

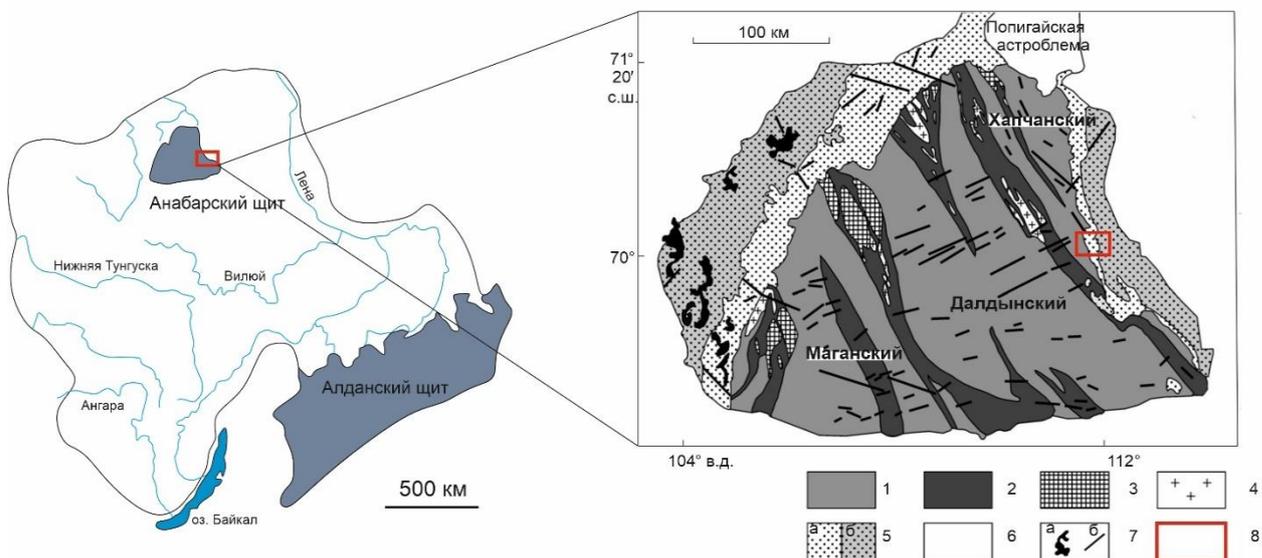


Рис. 1.2. Карта-схема Сибирской платформы с отмеченным районом исследования, а также схема геологического строения Анабарского массива с отмеченным участком работ, составленные по (Веселовский и др., 2009; Купцова и др., 2015 и ссылки в них):

1 - архей-протерозойские террейны и пояса (Маганский, Далдынский, Хапчанский); 2 - раннепротерозойские зоны меланжа (Котуйкан-Монхоолинская, Билляхская и др.); 3, 4 - раннепротерозойские интрузии анортозитов (3) и гранитоидов (4); 5, 6 - осадочный чехол: 5 - раннерифейские отложения мукунской (а) и билляхской (б) серий, 6 - венд-палеозойские отложения; 7 - рифейские и триасовые магматические комплексы основного состава: а - силлы, б - дайки; 8 - район исследований 2022 года.

Анабарский массив входит в состав Сибирской платформы и был образован в раннепротерозойское время вследствие столкновения трёх кратонов: Маганского, Далдынского и Биректинского, последний из которых скрыт под Хапчанским поясом (Гусев, 2013). Данные кратоны разделены раннепротерозойскими зонами меланжа или тектоно-флюидитными (Молчанов и др., 2001; Купцова, 2012 и ссылки там), в состав которых входят габбро и анортозиты, метавулканы, гнейсы, кристаллосланцы, катаклазиты, бластомилониты. Их образование связано с последовательным надвиганием с северо-востока на юго-запад. Так Котуйкан-Монхоолинская зона разделяет Маганский и Далдынский кратоны, а Билляхская - Далдынский кратон и Хапчанский пояс. Во время коллизии породы, слагающие кратоны, претерпевали метаморфизм и внедрение гранитных интрузий. Сейчас мы наблюдаем вскрытую структуру, испытавшую гранулитовый

метаморфизм и разделенную на архей-нижнепротерозойские кристаллические породы фундамента и рифей-палеозойский чехол.

Маганский кратон образует юго-западную часть Анабарского массива. Его исходная кора является архейской и сложена плагиогнейсами, первично являвшимися чарнокитами и эндербитами (Розен и др., 2006). С запада Маганский кратон перекрыт мощной осадочной толщей рифей-палеозойского чехла, а с востока погружен под Котуйканскую зону смятия. Слагающие кратон породы метаморфизованы в гранулитовой фации и представлены верхнеанабарской и вюрбюрской сериями.

Далдынский кратон составляет центральную часть. Он так же как и Маганский представлен архейской корой, состоящей из гранулитовых пород далдынской и верхнеанабарской серий. Породы самой древней, нижнеархейской далдынской серии обнажаются в центральной и юго-западной частях Анабарского массива. Они были образованы в обстановке субдукции (Государственная..., 2016). Далдынская серия условно делится на две толщи: нижнюю (бекелехскую) и верхнюю (килегерскую). Бекелехская толща является сланцево-гнейсовой и сложена в основном двупироксеновыми, гиперстеновыми гнейсами и пироксен-плагиоклазовыми и гранат-пироксен-магнетитовыми кристаллосланцами. Килегерская толща имеет в своем составе двупироксеновые плагиогнейсы и пироксеновые кристаллические сланцы, а также в большом объеме кварциты и их разновидности. Отличительной особенностью пород далдынской серии является пониженная железистость гранатов и повышенная глиноземистость в гиперстенах, свидетельствующие о более высоких значениях Р-Т параметров метаморфизма по сравнению с вышележащей анабарской серией (Брюховецкий и др., 2011).

Нижне-верхнеархейская верхнеанабарская серия занимает преимущественно центральную часть массива. С перекрывающей хапчанской серией верхнеанабарская имеет четкие контакты, в то время как с подстилающей далдынской серией контакты расплывчатые, местами условные. Серия также подразделяется на две толщи: нижнюю (амбардахскую) и верхнюю (эйиминскую). Наполнение преимущественно гиперстен- и двупироксен-плагиогнейсовое. Местами проявлены зоны мигматизации.

С запада Далдынский кратон надвинут на Котуйканскую зону, а с востока идет его погружение под Билляхскую зону (Розен и др., 2006). Оба кратона, Маганский и Далдынский, представляют собой выведенные на поверхность нижние слои земной коры (Розен и др., 2006).

Восточнее Далдынского располагается Биректинский кратон, перекрытый Хапчанским поясом, который сложен отложениями нижнепротерозойской хапчанской

серии. Хапчанская серия состоит из хаптасыннахской и билээх-тамахской толщ. Породы хапчанской серии были сформированы в обстановке пассивной континентальной окраины, которая затем перешла в коллизионную стадию (Государственная..., 2016). Отложения в составе данной серии представлены гранат-биотитовыми плагиогнейсами, а также силикатно-карбонатными образованиями первично осадочного генезиса. Согласно последним полевым наблюдениям, а также картам первого поколения масштаба 1:200000 (Государственная..., 1965) на участках работ 2022 г. среди пород хапчанской серии отдельными телами встречаются линзовидные тела мраморов, кальцифиров, салитоскаполитовых и флогопито-диопсидовых пород, а также биотит-силлиманитовых и кордиерит-силлиманитовых гнейсов.

Таким образом, разрез Анабарского массива начинается с высокометаморфизованных пород, входящих в состав архей-протерозойских серий, которые перекрываются платформенными образованиями. Структурно-вещественные комплексы фундамента представлены в основном гнейсами и кристаллическими сланцами различного состава. Исходя из легенды к карте масштаба 1:1000000 породы фундамента представляли собой изначально осадочные или осадочно-вулканогенные образования, претерпевшие в дальнейшем метаморфическое, магматическое и тектоническое влияние с образованием зон мигматизации, катаклаза и милонитизации (Государственная..., 2016). При этом выделяется два этапа преобразования пород в условиях гранулитовой фации: раннеархейский (в период ~2,8-2,7 млрд. лет) и позднеархейский (1,9 млрд. лет, Сергеева, 2021).

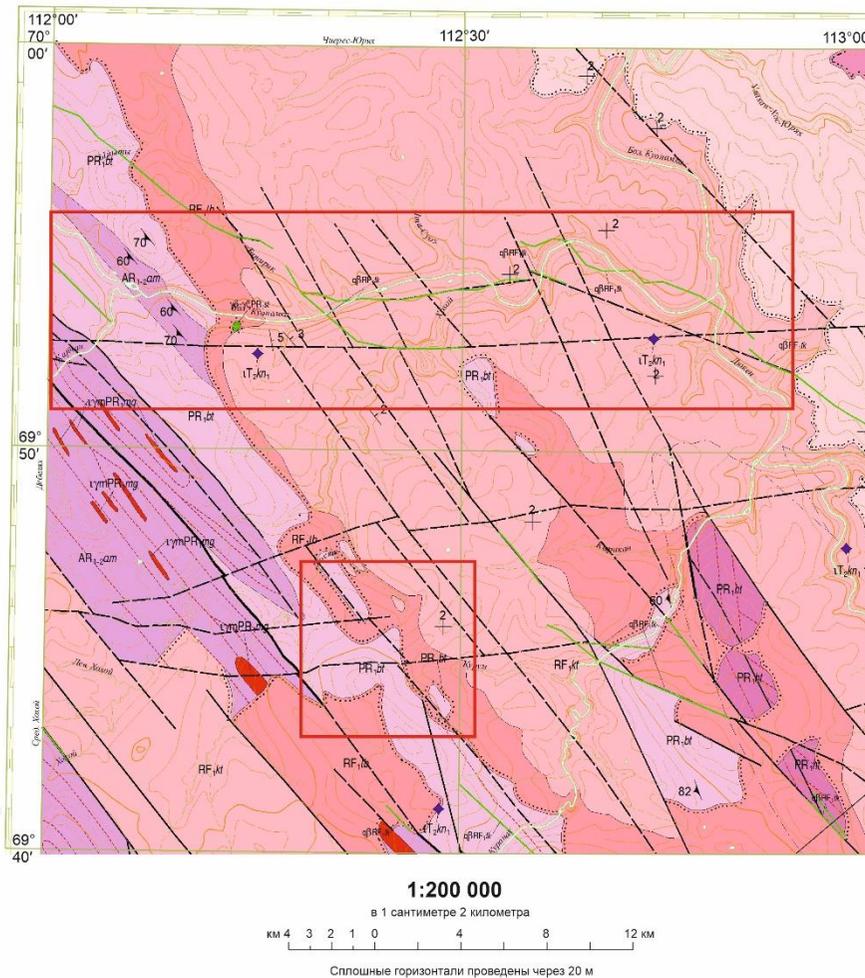
Непосредственно на участках работ 2022 г. вскрываются позднеархейская амбардахская толща в составе верхнеанабарской серии, а также раннепротерозойские хаптасыннахская и билээх-тамахская толщи в составе хапчанской серии (рис. 1.3).

Платформенный чехол начинают отложения рифея, которые включают в себя терригенные образования мукунской серии. Они отделены угловым несогласием от складчатого фундамента и залегают на коре выветривания, но в некоторых местах контакт с нижележащими толщами тектонический (рис. 1.3). Поверхность несогласия представляет собой немаловажный интерес из-за потенциальных урановых месторождений (Молчанов и др., 2001), ресурсы которых в последнее время из-за роста цен на данный вид сырья могут быть достаточными для начала их освоения и перевода в запасы. Платформенные комплексы накапливались в пределах внутрикратонного бассейна (Государственная..., 2016). Они имеют широкий вещественный диапазон и представлены как терригенными, так и породами хемогенно-органогенного происхождения. Кроме того, рифейские образования западной и восточной области отличаются по мощностям и литологическому составу

(Купцова и др., 2015), что позволяет высказать предположение о накоплении пород в двух разных бассейнах седиментации. Однако их взаимоотношение остаётся неясным по причине отсутствия чехла вследствие его возможного размыва в южной части Анабарского массива и наличия Попигаической астроблемы на севере (Государственная..., 2016).

На территории массива развит интрузивный и эффузивный магматизм, который подразделяется на пять неравнозначных между собой по интенсивности временных цикла: архейский, раннепротерозойский, раннепротерозойско-рифейский, позднепалеозойский и мезозойский (Брюховецкий и др., 2011; Ernst et al., 2016; Gladkochub et al., 2022). Архейский и раннепротерозойский циклы включают в себя несколько этапов магматизма с внедрением основных пород и гранитообразованием. Эти интрузивные комплексы хорошо прослеживаются и выделяются в пределах всего Анабарского массива (Государственная..., 2016). Раннепротерозойско-рифейский этап характеризуется широко проявленным дайкообразованием, представленным долеритами и габбро-долеритами. Образования позднепалеозойского-мезозойского магматизма принадлежат к формации сибирских траппов, представляя собой дайки и силлы, сложенные породами нормального и щелочного ряда. В мезозойский период также проявлен кимберлитовый магматизм, выделяющийся в трёх районах Анабарского массива: Средне-Оленекский, Нижне-Оленекский и Куонамкский (Брюховецкий и др., 2011).

ФРАГМЕНТ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ КАРТЫ РФ масштаба 1:200 000
 Издание второе
 Анабаро-вилюйская серия
 ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА ДОЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ
 R-49-XXIII, XXIV (Дюкен)



ФРАГМЕНТ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ КАРТЫ РФ масштаба 1:200 000
 Издание второе
 Анабаро-вилюйская серия
 ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА ДОЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ
 R-49-XXIII, XXIV (Дюкен)

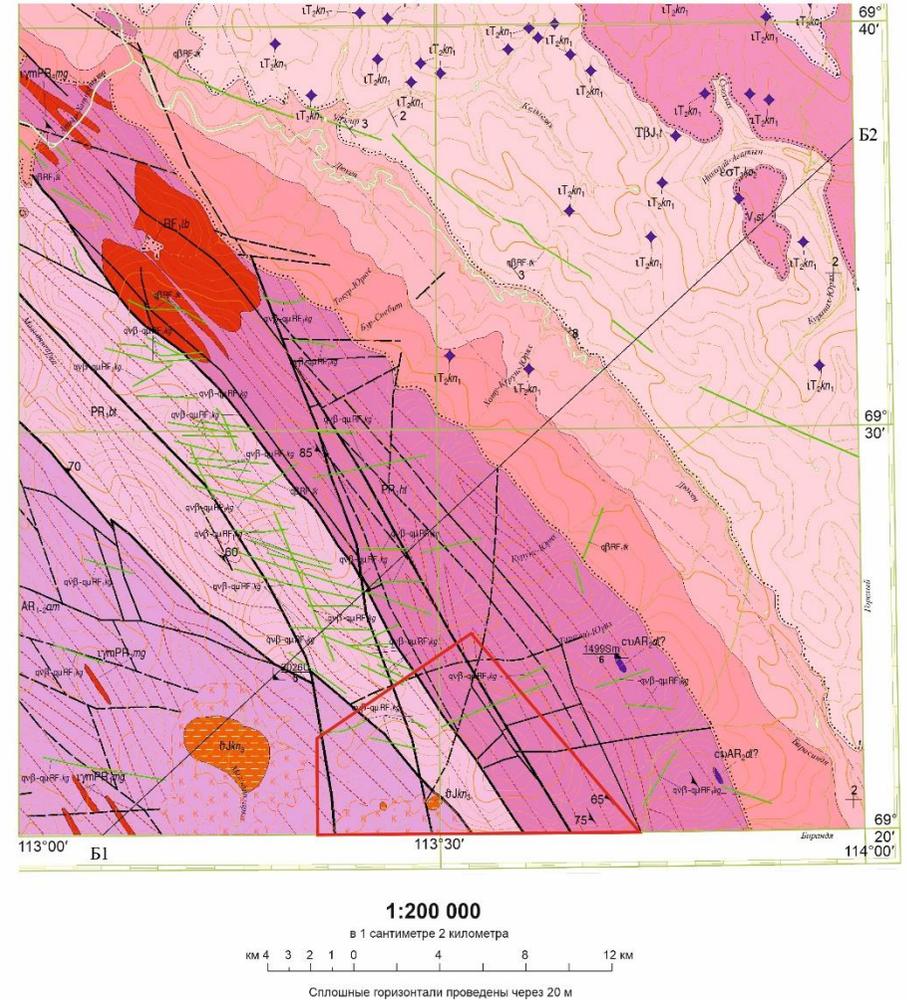


Рис. 1.3. Участки работ 2022 года (красные прямоугольники), вынесенные на фрагменты предварительной геологической карты дочетвертичных образований R-49-XXIII, XXIV (Дюкен) масштаба 1:200000. Предварительную геологическую карту составил Васюкевич К. Е. К карте составлены предварительные геологические разрезы с юго-запада на северо-восток (см. ниже).

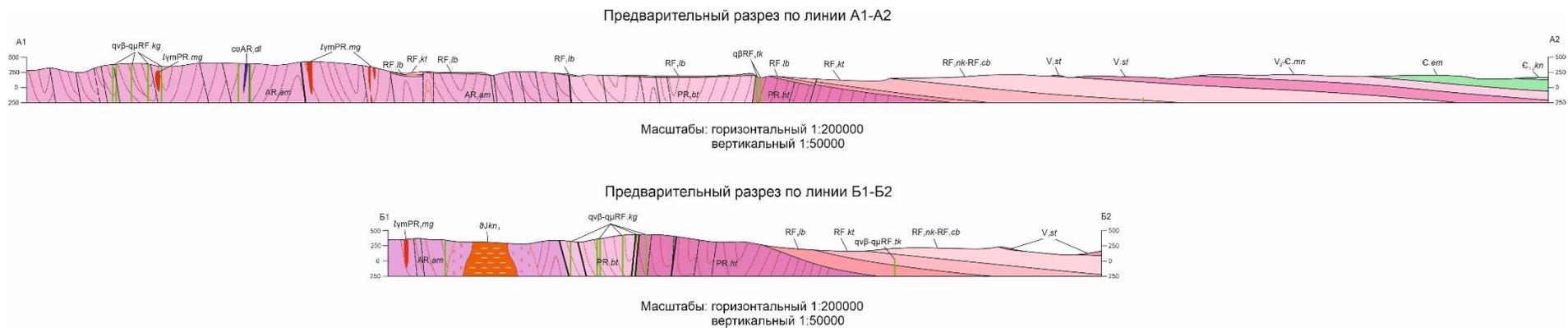


Рис. 1.3 (продолжение). Предварительные геологические разрезы с юго-запада на северо-восток по линиям А1-А2 и Б1-Б2. Составил Карпинчик Г. О.

СТРАТИГРАФИЧЕСКАЯ КОЛОНКА

Антропоген	Эоценовая	Эрагена	Система	Отдел	Ярус	Горизонт	Индекс	Колонка	Мощность, м	Характеристика подразделений	Район								
П Р О Т Е Р О З О Й С К А Я	В Е Р Х Н Е П Р О Т Е Р О З О Й С К А Я	НИЖЕРИФЕЙСКАЯ	ВЕНДСКАЯ	НИЖНИЙ	ТОМ-МОТ-СКИЙ	Сунна-линский	C _{1-2kl}		30-50	Куонамская свита. Горючие сланцы и известково-глинистые породы, известняки с прослоями мергелей и аргиллитов. Остатки <i>Lernmontovia grandis</i> Letu., <i>Ladzewanovskii</i> (Letu.), <i>Koolezia jacutensis</i> Letu., <i>Paramitocassa petropavlovskii</i> Sur., трилобиты <i>Tetragulaspis gibbus</i> (Linnrs.), <i>Elnathia alexandrovii</i> N. Tchern., <i>Koimankites insuetus</i> Laz., <i>K. rotundatus</i> N. Tchern., <i>K. ex gr. fregiensis</i> N. Tchern., брахиоподы <i>Acrotreta rojakovi</i> Letu.	Анабаро-Куонамский								
							C _{em}		90-180	Эмянская свита. Пестроцветные глинистые известняки и мергели, прослой водорослевых и органогенно-обломочных известняков. Остатки <i>Anabarites trisulcatus</i> Miss., <i>A. tristichus</i> Miss., <i>Cambrotubulus</i> sp., <i>Hyolithellus tenuis</i> Miss., <i>Torellasp.</i> , <i>Turchetha</i> sp., <i>Loculitheca</i> sp., <i>Tikstheca</i> sp., <i>Aldanella</i> sp., <i>Oelandiella</i> sp., <i>Anabarella plana</i> Vost., <i>Ladatheca ornata</i> (Syss.), <i>Turchetha crassoocochia</i> (Syss.), трилобиты <i>Pogetiellus lenacis</i> (Toll.), <i>Tetragulaspis</i> ex gr. <i>rarus</i> Laz.									
							V _{2-C1mn}		70-136	Манькайская свита. Пестроцветные известняки, часто глинистые и алевролиты, известковые доломиты и мергели. В основании кварцевые песчаники с линзами гравелитов и конгломератов. Остатки <i>Anabarites trisulcatus</i> Miss., <i>A. tristichus</i> Miss., <i>Cambrotubulus decurvatus</i> Miss., <i>Protogertzina anabarica</i> Miss., водоросли <i>Renalcis jacuticus</i> Korde, <i>R. gelatosum</i> Korde, гастроподы и хиолиты <i>Oelandiella korobkovi</i> Vost., <i>Anabarella plana</i> Vost., <i>Ananella rosanovi</i> Miss., <i>Larwortheella tornosa</i> Miss., <i>Hyolithellus vladimirovae</i> Miss., спиккулы губок <i>Chancelloria</i> .									
							V _{1st}		95-160	Старореченская свита. Коричнево-серые известковистые и алевролитные доломиты, прослой оолитовых, обломочных доломитов, линзы гравелитов и конгломератов. В основании песчаники. По всему разрезу водорослевые образования типа <i>Collemia</i> . В псевдооолитовых известковистых доломитах <i>Tesicularites bolnydytiformis</i> (Krasn.), <i>V. lobatus</i> Reitl., <i>Vermiculites irregularis</i> (Reitl.).									
							RF _{2-alk-RF3db}		60-300	Неколзская и чурбукская свиты нерасчлененные. Доломиты коричневые, желтовато-серые, известковистые, иногда битуминозные, прослой строматолитов, онколитовых доломитов и глинистых сланцев. В основании пестроцветные песчаники с прослоями гравелитов и конгломератов. В волнистослоистых доломитах строматолиты типа <i>Stratifera</i> и онколиты <i>Osagia asuleata</i> Z. Zhur., в известковом доломите микроскопические проблематические остатки <i>Asterosphaeroides radiusus</i> Z. Zhur.									
							RF _{1kt}		130-450	Котуйканская свита. Доломиты коричневые, пестроцветные, онколитовые, прослой доломитовых брекчий, алевролитов, аргиллитов, песчаников, линзы кремней. Строматолиты <i>Kussella kussensis</i> Masl., <i>Stratifera undata</i> f. n., <i>Microstylis perplexus</i> gr. et. f., споры рода <i>Zopholigotriletes</i> .									
							RF _{1lb}		16-240	Лабатахская свита. Песчаники, гравелиты полевошпатово-кварцевые и кварцевые оранжевые, красно-бурые и зеленовато-серые, прослой конгломератов									
							А Р Х Е Й С К А Я	ВЕРХНЕАРХЕЙСКАЯ	СРЕДНЕ-ЛОПИЙСКАЯ	НИЖНЕКАРЕЛЬСКАЯ					PR _{1bt}		3500-4000	Билзэх-тамахская толща. Гранатые и пироксен-гранатые, биотит- и графитсодержащие гнейсы и плаггиогнейсы, прослой двупироксеновых, салитовых, гиперстеновых плаггиогнейсов и кристаллических сланцев, скаполит-салитовых пород и кальцифиров.	Хапчакский
															PR _{1ht}		1200-1500	Хаптасыннахская толща. Гранатые, гиперстен-гранатые, гиперстеновые, салитовые, двупироксеновые плаггиогнейсы и биотит-графитсодержащие разновидности этих пород с подчиненными прослоями и линзами кальцифиров, мраморов, скаполит-салитовых пород и андрадит-салитовых, реже силлиманит-кордиеритовых гнейсов.	
															AR _{2am}		4000-5000	Амбардахская толща. Гиперстеновые, двупироксеновые, реже салитовые плаггиогнейсы и гнейсы, прослой двупироксеновых, амфибол-двупироксеновых кристаллических сланцев, линзы биотит-гранатых, силлиманит-гранатых плаггиогнейсов и гнейсов, магнетитовых кристаллических сланцев, реже салит-скаполитовых и графитсодержащих пород.	

Рис. 1.3. (продолжение). Стратиграфическая колонка к предварительной геологической карте дочетвертичных образований масштаба 1:200000. Составила Александра Е. Д.

2. Очерк геологического строения рифей-вендского обрамления Анабарского массива

2.1 Состав и строение разреза нижней части докембрийского чехла

Рифей-вендские отложения образуют древний чехол Анабарского массива, обрамляя его периферию (рис. 1.2). Можно установить две серии: нижняя - мукунская, представлена терригенными, верхняя - билляхская, представлена терригенно-карбонатными породами (рис. 2.1). Они залегают с резким угловым несогласием на породах фундамента, а выше перекрываются вендскими и фанерозойскими образованиями (Государственная..., 2016).

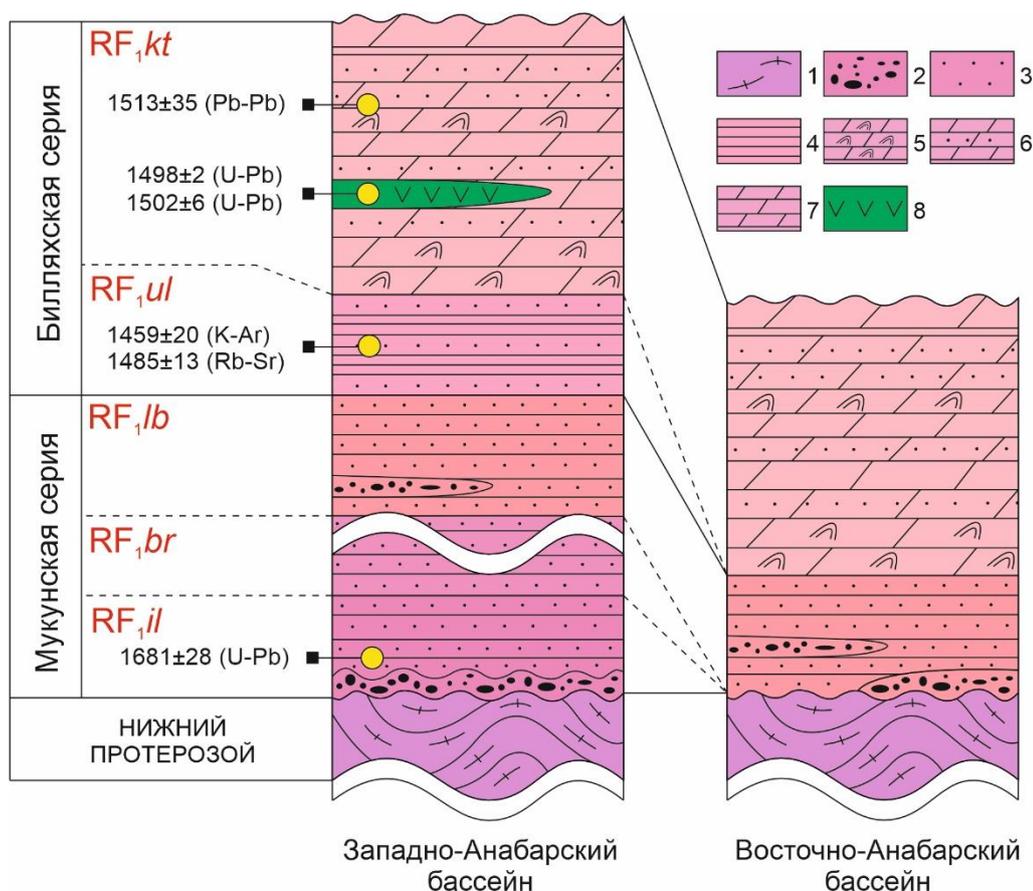


Рис. 2.1. Состав и строение разреза нижней части докембрийского чехла (на основе Горохов и др., 2019 и ссылки там).

Условные обозначения: 1 - метаморфические породы фундамента, 2 - гравелиты, 3 - песчаники, 4 - аргиллиты, 5 - доломиты с кремнями, 6 - строматолитовые карбонаты, 7 - доломиты, 8 - силлы долеритов.

Указанные на рисунке датировки (млн лет): 1485±13 и 1459±20 - Rb-Sr и K-Ar возрасты глауконита усть-ильинской свиты (Горохов и др., 1991; Зайцева и др., 2016); 1681±28 - U-Pb возраст обломочного циркона песчаников мукунской серии (Khudoley et al., 2015); 1513±35 - Pb-Pb изохрона билляхских доломитов (Горохов и др., 2019); 1502±6, 1498 ± 2 - U-Pb возраст бадделеитов из долеритовых силлов, рвущих доломиты билляхской серии (Ernst et al., 2016).

На западном склоне Анабарского массива мукунская серия имеет мощность до 700 м, в то время как на востоке серия выклинивается и изменяет свои мощности в пределах 0-200 м (рис. 2.1, Гусев и др., 1985). Кроме того, наблюдаются и изменения в литологическом составе (Купцова и др., 2015). В южной и северо-восточной частях массива рифейские отложения не выделяются в связи с эрозией, произошедшей в венде, и импактным событием, оставившем позднемеловую Попигайскую астроблему (Брюховецкий и др., 2011). Таким образом, терригенные породы мукунской серии могли накапливаться в двух бассейнах седиментации: Восточно-Анабарском и Западно-Анабарском, однако их взаимоотношения остаются неясны. В структурном плане эти бассейны теоретически могут соответствовать окраинам Уджинского (Хастахско-Уджинского) и Котуйского (Котуйско-Фомичевского) авлакогенов соответственно (Сурков, 2002).

В объяснительных записках и на картах первого поколения мукунская серия выделяется в виде самостоятельной свиты, расчлененной на нижнюю и верхнюю пачки, которые сложены гравелитами и кварцевыми песчаниками соответственно (Государственная..., 1963). В настоящее время в составе серии последовательно выделяются следующие свиты снизу-вверх по разрезу: ильинская, бурдурская и лабазтахская (рис. 2.1). Свиты обнажены на западе Анабарского массива, однако на восточном фланге, по-видимому, прослеживаются лишь ильинская и лабазтахская (Брюховецкий и др., 2011).

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 выделяются песчаники, кварцевые красно-бурые гравелиты и также линзы конгломератов (Государственная..., 2016). На северо-западе обнажаются породы вышележащей бурдурской свиты. Мощность свиты составляет 275-485 м, а ее наполнение представлено кварцевыми железистыми песчаниками красных и 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. Мощность свиты составляет 16-240 м, а в ее строении выделяются песчаники, сменяющиеся вверх по разрезу полевошпатово-кварцевыми и мономиктовыми кварцевыми гравелитами оранжевого и красно-бурого цветов и прослоями конгломератов, которые перекрываются карбонатами и строматолитовыми постройками билляхской серии (Государственная..., 2016). Выходы лабазтахской свиты неоднородны - если на северо-востоке это стратиграфически полные разрезы, то на востоке мощности варьируют, а сами породы характеризуются резкими

фациальными переходами вследствие многочисленных размывов (Брюховецкий и др., 2011 и ссылки там).

Судя по данным предшественников (Горохов, 2019 и ссылки там), накопление мукунской серии началось не позднее 1681 ± 28 млн лет (Khudoley et al., 2015), а закончилось до 1500 млн лет назад, на что указывают данные по обломочным цирконам из низов разреза и U-Pb возраст силлов, прорывающего контакт с вышележащей билляхской серией (Ernst et al., 2016).

Морфология самой молодой популяции цирконов со средневзвешенным возрастом 1681 ± 28 млн лет (Khudoley et al., 2015) в подошве мукунской серии, по всей видимости, указывает на размыв кислых интрузий типа гранитов-рапакиви местного происхождения. Однако на самом Анабарском массиве граниты похожего возраста пока не обнаружены, но это не исключает возможности их нахождения в близких к Анабару местах. Кроме того, данные предшественников указывают на наличие кислых вулканитов близкого возраста в пределах юго-востока Алданского щита и Приколымского массива (Khudoley et al., 2007). Это свидетельствует о региональных внутриплитных магматических событиях в пределах Сибирского кратона.

Нерешенной остается и задача, связанная с тектонической обстановкой в период после раннепротерозойского (1,9 млрд. лет, Сергеева, 2021) метаморфизма пород фундамента и до начала накопления мукунской серии (~1,7 млрд лет, Khudoley et al., 2015).

2.2 Состав и строение разреза средней и верхней частей докембрийского чехла

Выше мукунской согласно залегает билляхская терригенно-карбонатная серия (рис. 2.1). Ее начало устанавливается по смене песчаников на доломиты и появлению строматолитов. Для билляхской серии характерна большая фациальная изменчивость и непостоянная мощность. Серия часто подразделяется на две свиты: котуйканскую и юсмастахскую. Однако по картам нового поколения на западном склоне Анабарского щита в базальной части разреза билляхской серии выделяется еще одна свита - усть-ильинская (Государственная..., 2016; Купцова, 2012 и ссылки там). Мощность усть-ильинской свиты не превышает 50 м, а в ее составе прослеживается переслаивание коричневых, зеленовато-серых и темно-серых до черных песчаников, алевролитов и аргиллитов с прослоями доломитов.

Выходы котуйканской свиты наблюдаются вдоль восточной границы Анабарского массива. Наиболее полный разрез представлен в нижнем течении реки Б. Куонамка. Котуйканская свита подразделяется на нижнюю и верхнюю подсвиты. Все это хемогенные и строматолитовые доломитовые породы с прослоями и линзами терригенных и глинистых образований, представленных доломитовыми брекчиями, алевролитами и аргиллитами. Мощность свиты варьирует в диапазоне 130-450 м (Государственная..., 2016). Выше по разрезу с размывом залегают отложения юсмастахской свиты, состоящей из терригенных пород в нижней части и доломитов в верхней. Мощность свиты около 625 м (Купцова, 2012).

Возраст всей билляхской серии Восточно-Анабарского бассейна косвенно определен по датированию бадделеита из дайки, рвущей нижнюю часть юсмастахской свиты (1384 ± 2 млн лет Ernst et al., 2000). Полученный возраст позволил выделить серию в составе раннерифейских образований. В Западно-Анабарском бассейне билляхская серия прорывается силлами с возрастом около 1500 млн лет, а ее изохронный Pb-Pb возраст составляет 1513 ± 35 млн лет, также указывая на ее накопление в раннем рифее (Ernst et al., 2016; Горохов и др., 2019).

Терригенно-карбонатные отложения рифея несогласно сменяются карбонатными вендскими, которые завершают докембрийский разрез на территории Анабарского массива. Венд представлен старореченской и манькайской свитами. В составе старореченской свиты проявлены рыжие, темно-, светлокоричневые, бежевые доломиты с обилием ископаемой фауны. В небольшом объеме присутствуют прослои и линзы песчаников, мергелей, глинистых сланцев. В составе манькайской свиты представлены карбонатные и глинистые породы с многочисленными прослоями их разновидностей.

3. Методика исследования и объём работ

3.1 Методика проведения полевых исследований

Район работ, проводившихся Анабарской партией ВСЕГЕИ в период 17.06.22-30.08.22, располагается в юго-восточной части Восточно-Анабарского бассейна (бассейн реки Большая Куонамка), где разрез рифейских отложений был опробован на различные виды анализа с двух обнажений: вдоль реки Б. Куонамка (обнажение 1) и на ручье Дюсун (обнажение 2) (рис. 3.1).

ФРАГМЕНТ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ КАРТЫ РФ масштаба 1:200 000
Издание второе
Анабаро-вилуйская серия
ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА ДОЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ
R-49-XXIII, XXIV (Дюкен)

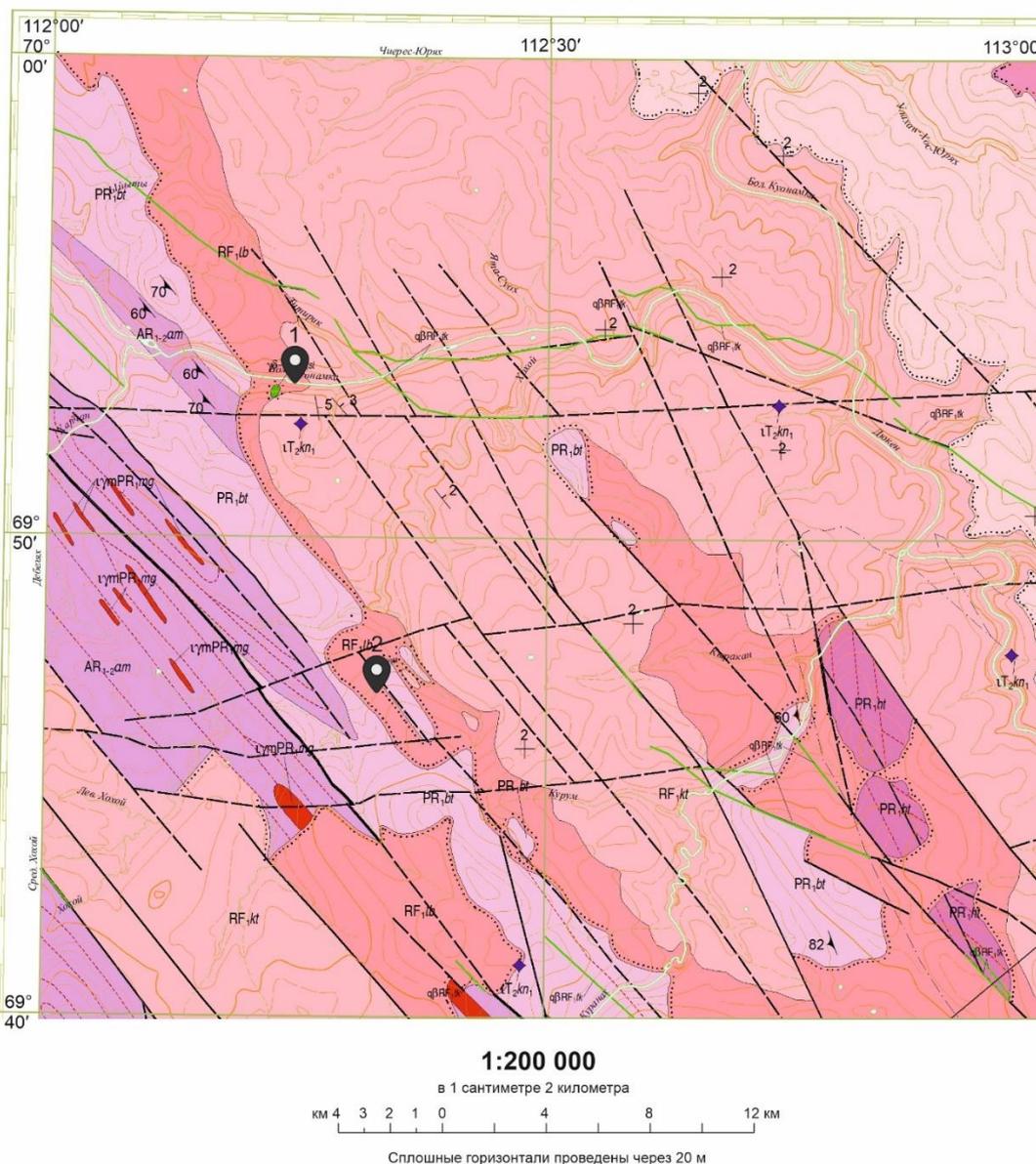


Рис. 3.1. Места отбора проб рифейских песчаников лабазтахской свиты на фрагменте территории листа карты R-49-XXIII, XXIV. На севере изображено место опробования на реке Б. Куонамка (обнажение 1), на юге - на ручье Дюсун (обнажение 2). Метки точек показаны внемасштабным темно-белым знаком. Легенда к карте приведена на рис. 1.3.

Образцы с коренных выходов вдоль р. Б. Куонамка собирались последовательно с разных стратиграфических слоев с шагом 10-30 м между точками отбора. Опробование началось у кровли лабзтахской свиты и продолжалось вниз по разрезу. Собранный материал охватил верхнюю часть разреза всей свиты, что предполагает изучение характера изменений и особенностей состава нижнерифейских пород в пределах одной толщи. Видимая мощность обнажений не превышала 5 м. Длина всего интервала наблюдений составила 280 м. Залегание пород субгоризонтальное. Наблюдалась плитчатая отдельность по поверхностям слоистости, в результате чего на кровле пород обнажались знаки ряби (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Плитчатая отдельность и знаки ряби (в правом углу) из коренных выходов песчаников лабзтахской свиты в нижнем течении реки Б. Куонамка.

Важно отметить достаточно контрастную смену минерального состава образцов, обусловленную доминированием кварца либо полевого шпата над остальными минералами в пределах одного обнажения. Породы представлены бурыми, темнокрасными, темными, рыжими песчаниками, содержащими прослой гравелитов. Гравелиты характеризуются кварцевой галькой (1-5 мм), которая может концентрироваться как в виде самостоятельных слоев, так и в хаотичном порядке. Структура пород разномасштабная, текстура массивная.

Макроскопически минеральный состав представлен полевыми шпатами, кварцем, гематитом, в виде вкраплений иногда заметны пластинки слюды. Песчаники часто содержат трещины, по которым развиваются процессы ожелезнения. Некоторые образцы сильно выветрелые, рыхлые, плохосцементированные.

С ручья Дюсун, расположенного в 9 км южнее реки Б. Куонамка, была отобрана проба массой 5-6 кг с одной точки наблюдения для выделения обломочных цирконов и изучения минерального состава. На точке наблюдения обнажается коренной выход красноцветных песчаников лабазтахской свиты (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Слева - отбор проб из коренного выхода, справа - коренной выход.

Видимая мощность пород в обнажении 1.5-2 м, протяженность 20 м. Сверху и снизу коренной выход усыпан глыбами того же состава. Песчаники слоистые, розового, бежевого цвета. Зернистость меняется в зависимости от прослоя. Текстура горизонтально-слоистая, однако в разбросанных глыбах текстура пород пятнистая, неоднородная. Породы более сильно сцементированы по сравнению с образцами на р. Б. Куонамка. Широко проявлены трещины ожелезнения и крупные вкрапления гематита. Кварцевые гальки однородно заполняют общую массу и выделяются по своим размерам.

3.2 Методика обработки каменного материала и проведения экспериментальных исследований

Для комплексного изучения минерального состава песчаников лабзтахской свиты был применен ряд методов: количественный рентгенофазовый анализ (РФА), рентгеноспектральный микроанализ, микроскопическое изучение шлифов, U-Pb датирование обломочных цирконов.

Для проведения РФА и выяснения характера изменений минерального состава песчаников сверху-вниз по разрезу пробы с первого обнажения (р. Б. Куонамка, рис. 3.1) были поделены на отдельные группы, так как весь интервал наблюдения от кровли свиты до ее середины охватил большую часть разреза и включал суммарно 83 образца. Рассматриваемые песчаники в коренных обнажениях имеют плитчатую отдельность. Из каждого такого слоя был отобран отдельный образец. Всего было 6 точек наблюдения с шагом 10-30 м, в которых отбиралось от 6 до 16 образцов. Пробы были поделены таким образом, чтобы:

- 1) было достаточно материала для РФА;
- 2) можно было набрать необходимое количество статистических данных и максимально охарактеризовать все литологические изменения.

Поэтому в пределах одной точки могло выходить от двух и более групп. В итоге, было выделено 25 групп проб с учетом образцов со второго обнажения (р. Дюсун).

В дальнейшем каменный материал дробился и измельчался в лаборатории пробоподготовки Института Наук о Земле. Качественный и количественный РФА валовых проб проводился в РЦ «Рентгенодифракционные методы исследования» Научного парка СПбГУ и позволил разделить полевые шпаты на калиевые и натриево-кальциевые, а также охарактеризовать процентное содержание породообразующих минералов обломочной фракции - кварца, самих полевых шпатов и карбонатов, что является неотъемлемой частью для классификации песчаников согласно диаграммам Дикинсона и Петтиджона (Dickinson, 1985; Петтиджон и др., 1976).

Изучение минералогических особенностей и определение акцессорных минералов в шлифах проводилось в РЦ «Микроскопии и микроанализа» научного парка СПбГУ с помощью рентгеноспектрального микроанализа.

Рентгенофазовый анализ

Основы рентгеновского фазового анализа заключаются в облучении монохроматическим рентгеновским излучением предварительно истертого в порошок минерального материала (Штольц и др., 2005). Теоретическое обоснование метода заключается в том, что когда луч определенной длины волны λ падает на совокупность

атомных плоскостей, параллельных друг другу и отстоящих на расстоянии d , то он порождает дифрагированный луч под углом θ . Это указывает на то, что атомные плоскости кристалла, которые могут совпадать или быть параллельными его граням, способны отражать рентгеновские лучи, что будет выражаться в виде максимумов интенсивности дифрагированных лучей. Получаемая дифракционная картина будет удовлетворять уравнению Брэгга-Вульфа:

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

где λ – длина волны рентгеновских лучей, d – межплоскостное расстояние, θ – угол скольжения лучей, n – порядок дифракции.

Таким образом, по интенсивности пиков, отражённых от определённых атомных плоскостей можно изучить закономерности и симметрию кристалла, измерить межплоскостные расстояния d , углы между гранями и т.д. и, следовательно, диагностировать кристаллические вещества в порошке.

Однако у метода есть ограничения, связанные с невозможностью идентификации очень малого количества вещества. Кроме того, существует проблема наложения пиков, например, калиевого полевого шпата с рутилом. Погрешность метода 2-5 % содержания соответствующего минерала.

Факторный анализ

Помимо количественной оценки валового состава песчаников было необходимо изучение минералов тяжелой фракции с целью установления корреляционной связи между ними и проведения факторного анализа (Котова, Булдаков, 2009) для выхода на возможные источники сноса. Факторный анализ является статистическим методом и полезным инструментом при исследовании явлений со сложной структурой, характеризующейся множеством эмпирически полученных признаков или переменных. При этом предполагается наличие взаимосвязи, то есть определенная корреляция между переменными. О корреляции рассматриваемых переменных говорит эллипсоид рассеяния, который характеризует разброс точек между друг другом - дисперсию (Котова, Булдаков, 2009, Рис. 7). Каждая переменная участвует в геологическом процессе, именуемом фактором. Фактор - это гипотетическая величина, отражающая изменения в природе и представляющая собой ассоциацию разных переменных. Причём с этим процессом они могут быть связаны как положительно, так и отрицательно. Иными словами, между фактором и первой группой переменных устанавливается прямая зависимость, а со второй группой - обратная. Связь между ними записывается в виде дроби, в числителе которой фиксируются переменные с положительным знаком, а в знаменателе - с отрицательным. Таким образом, при увеличении одной переменной закономерно уменьшается другая и

наоборот. Итак, факторный анализ сводит обширный материал к минимуму данных, что позволяет сформулировать какую-либо научную гипотезу.

В работе стояла задача по совокупности замеренных величин (полученного в ходе РФА количественного содержания минералов тяжелой фракции в разных пробах) попытаться выявить процессы, сформировавшие геологическую систему на конкретном этапе ее развития и понять, какие породы вносили вклад в ее формирование.

Для решения данной задачи необходимо было разделить легкую и тяжелую фракции друг от друга, чтобы в дальнейшем анализировать только тяжелые минералы. Выделение тяжелой фракции сначала проводилось на конденсационном столе СКЛ 2, а затем с помощью бромформа. В связи с этим после дробления каждый отдельный образец просматривался под биноклем с целью идентификации сростков тяжелой и легкой фракций. На основе этого подбирался оптимальный размер дробления - 0.5 или 0.25 мм. В противном случае, сростки на конденсационном столе уходили бы в среднюю или легкую фракцию либо не разделялись бы при доведении бромформом и, как следствие, сильно загрязняли пробы кварцем.

По окончании дробления образец с тяжелой фракцией исследовался с помощью рентгенофазового анализа. Предварительно полученный в ходе дробления и отделенный с помощью бромформа материал истирался до тех пор, пока зерна не переставали цепляться между пальцами. Затем порошок выкладывался на стекло и там же с помощью спирта равномерно распределялся на поверхности. После высыхания стекло с материалом помещалось в кювету, плотно придавливалось и выравнивалось по горизонтали. Сама кювета помещалась в автоматический порошковый дифрактометр D2Phaser (Bruker), после чего выставлялись необходимые параметры съемки и запускался эксперимент.

Рентгеноспектральный микроанализ и петрографическое изучение шлифов

Для изучения петрографических особенностей песчаников сверху-вниз по разрезу из сформированных 25 групп было сделано 22 прозрачно-полированных шлифа (ППШ, без покровного стекла, на эпоксидной смоле) с обоих обнажений и 3 шлифа с покровным стеклом со второго обнажения (р. Дюсун, рис. 3.1). Изготовление шлифов было необходимо для подсчета обломков пород, поли- и монокристаллического кварца, а также выяснения генезиса карбонатов, так как РФА считает все минералы, находящиеся в порошке, не разделяя их на аутигенные и терригенные. В связи с этим требовался дополнительный пересчет части зерен для классификации песчаников. Однако это не снижает достоинства РФА, так как колоссальное количество затраченного времени сокращается из-за отсутствия необходимости подсчета зерен во всех шлифах. Кроме того, исключается и субъективность

исследователя при диагностировании калиевых, натрий-кальциевых полевых шпатов и кварца, так как в некоторых случаях они могут плохо отличаться по внешним признакам.

ППШ были изготовлены с целью количественного разделения калиевых и натриево-кальциевых полевых шпатов, а также для изучения вторично образованных минералов и отдельных включений с помощью рентгеноспектрального микроанализа при помощи прибора Hitachi 3400N. При данном методе состав интересующего минерала исследуется в задаваемой точке, соответствующей участку малого объёма вещества. Объект помещается в вакуумную камеру анализатора, после чего происходит облучение поверхности образца пучком электронов высокой энергии. Это облучение выбивает электроны с оболочек атомов, что порождает излучение в рентгеновской части диапазона электромагнитных волн. Все элементы характеризуются индивидуальными наборами частот, по которым и определяется химический состав в точке.

У метода есть свои ограничения. Во-первых, данный метод не позволяет разделить элементы с переменной валентностью (например, отдельно показать Fe^{2+} и Fe^{3+}). Во-вторых, в таблицах данных невозможно будет встретить наиболее лёгкие химические элементы (такие как водород и др.).

Изотопные исследования

Для реконструкции истории формирования рифейских осадочных толщ юго-восточной части Анабарского бассейна было проведено U-Pb датирование обломочных цирконов из пробы, отобранной на р. Дюсун (рис. 3.1). Цирконы были выделены по стандартной методике и продатированы на вторично-ионном микрозонде SHRIMP II в ЦИИ ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург). Итоговые U-Pb датировки, полученные для каждого отдельного определения, фиксировались с аналитической ошибкой измерения равной $\pm 1\%$. Обработка полученных материалов производилась в программе IsoplotR. Все настройки были выбраны по умолчанию. Для расчета возрастов исходно использовались изотопные системы $^{207}Pb/^{235}U$ и $^{206}Pb/^{238}U$. Для дальнейших построений учитывались данные, рассчитанные в программе IsoplotR по отношению $^{207}Pb/^{206}Pb$, так как возраста, рассчитанные по отношению $^{206}Pb/^{238}U$, превышали 1000 млн лет (Gehrels, 2012). Далее полученные анализы отфильтровывались по дискордантности (D) (Gehrels, 2012), и при $D > 10\%$ они в дальнейшую интерпретацию не включались.

4. Результаты исследований

4.1 Результаты рентгенофазового анализа

После отбора образцов в результате сортировки исходного каменного материала было сформировано 22 пробы с обнажения вдоль р. Б. Куонамка и 3 пробы с обнажения на р. Дюсун. Общий объем выборки составил 25 проб. При этом одна проба подразумевает совокупность нескольких образцов, собранных с разных литологических слоев и находящихся на минимальном расстоянии друг от друга. Учитывая, что залегание отложений чехла субгоризонтальное, а отбор образцов с р. Б. Куонамка проводился от кровли пласта лабазтахской свиты до ее серединной части, то исследование велось четко сверху-вниз по разрезу. Такой подход пробоотбора позволил изучить историю накопления песчаного материала и проследить динамику изменения состава пород. После обработки каменного материала, методика которого описана в предыдущей главе, был проведен качественный и количественный рентгенофазовый анализ как легкой, так и тяжелой фракции песчаников. Съёмка образцов производилась с помощью железного β -фильтра для кобальтового анода. Результаты РФА для валовых проб представлены на рис. 4.1 и в табл. 1 в приложениях.

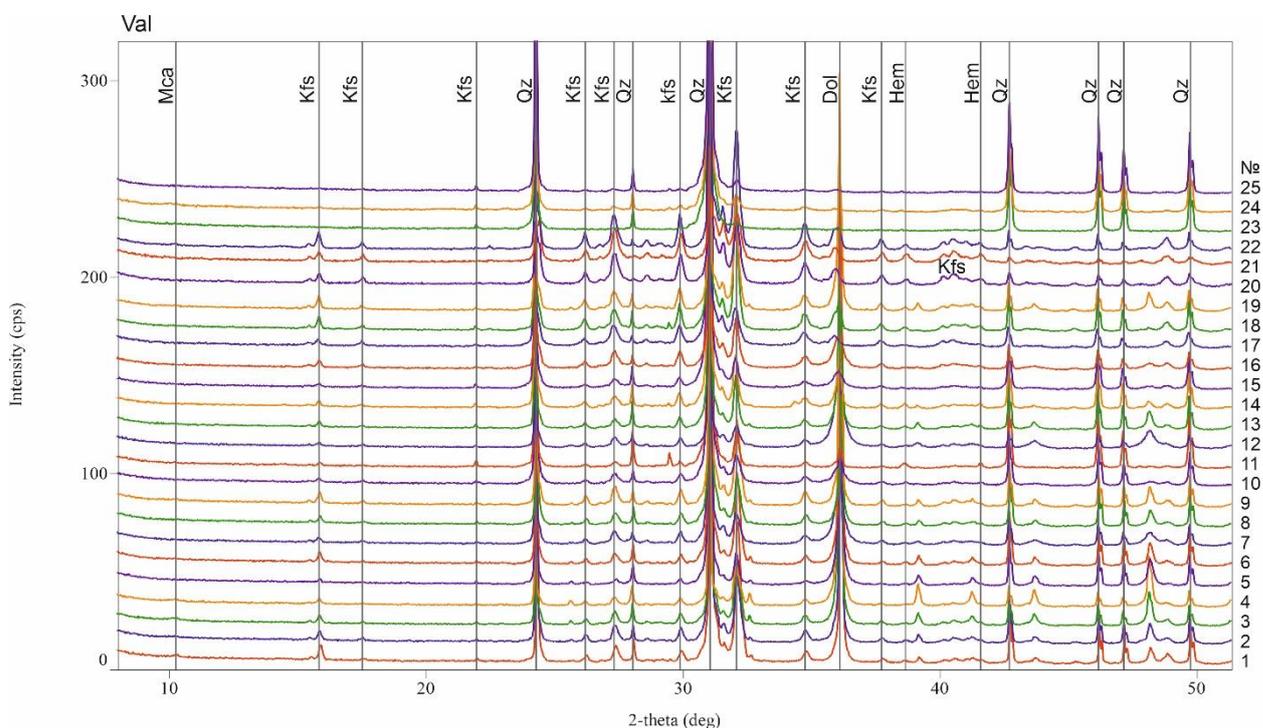


Рис. 4.1. Результаты рентгенофазового анализа 25 валовых проб песчаников лабазтахской свиты. Показаны основные диагностические дифракционные максимумы минералов. Mca - слюда, Kfs - калиевые полевые шпаты, Qz - кварц, Dol - доломит, Hem - гематит. По оси x - угол 2θ , по оси y - интенсивность излучения. Сокращенные названия минералов даны по (Warr, 2021).

Ввиду трудоемкости работ РФА тяжелой фракции был осуществлен для 15 из 25 проб. Результаты РФА для тяжелой фракции представлены на рис. 4.3 и в табл. 2 в приложениях. Не все легкие минералы смогли отделиться в процессе доведения тяжелой фракции бромформом. Именно поэтому дифракционные максимумы первых также присутствуют на рис. 4.2, однако содержание легких минералов небольшое и потому позволяющее установить качественный и количественный состав минералов тяжелой фракции.

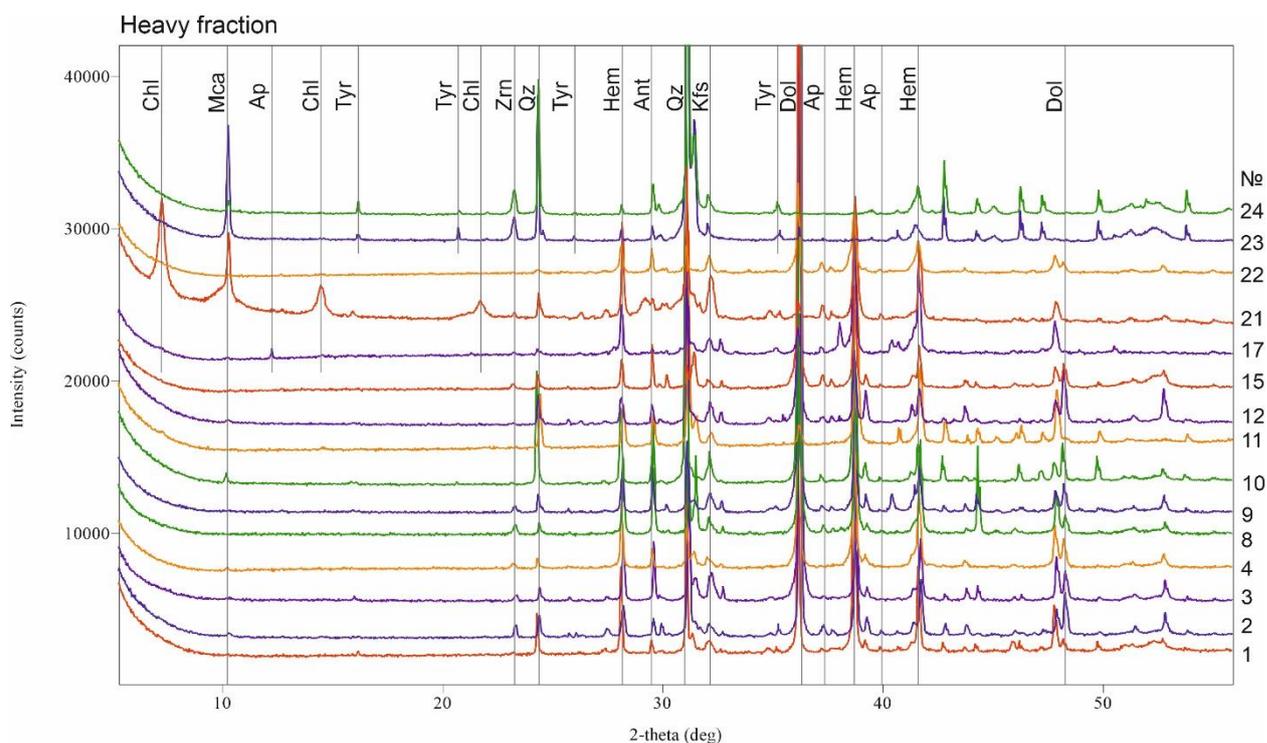


Рис. 4.2. Результаты рентгенофазового анализа 15 проб песчаников лабазтахской свиты с тяжелой фракцией. Показаны основные диагностические дифракционные максимумы минералов. Chl - хлорит, Mca - слюда, Ap - апатит, Tyr - турмалин, Zrn - циркон, Ant - анатаз, Kfs - калиевые полевые шпаты, Qz - кварц, Dol - доломит, Hem - гематит. По оси x - угол 2θ , по оси y - интенсивность излучения. Сокращенные названия минералов даны по (Warr, 2021).

Анализируя полученные данные РФА валовых проб, можно говорить о сильной дифференциации состава в пределах лабазтахской свиты. Для упрощения восприятия материала динамика изменения состава в зависимости от содержания породообразующих минералов в пределах разреза проиллюстрирована на рис. 4.3.

Длина пути пробоотбора вдоль реки Б. Куонамка составила 280 м, что соответствует примерно 30 м разреза по его мощности, начиная от кровли (образец № 10) и заканчивая срединно-верхней частью (образец № 22). Образцы № 7-10 гипсометрически залегали в более высоких литологических слоях нежели образцы № 1-6, поэтому именно первые

венчают разрез лабзтахской свиты. Соотношения образцов № 6 и № 11 проследить не удалось (на рис. 4.2. это отображено в виде волнистой линии), однако залегание последних явно ниже в разрезе, так как они отобраны в скрытых ранее слоях в день спада воды в реки. В связи с дождливыми погодными условиями и частыми выходами Куонамки из берегов, исследование срединной части не представлялось возможным.

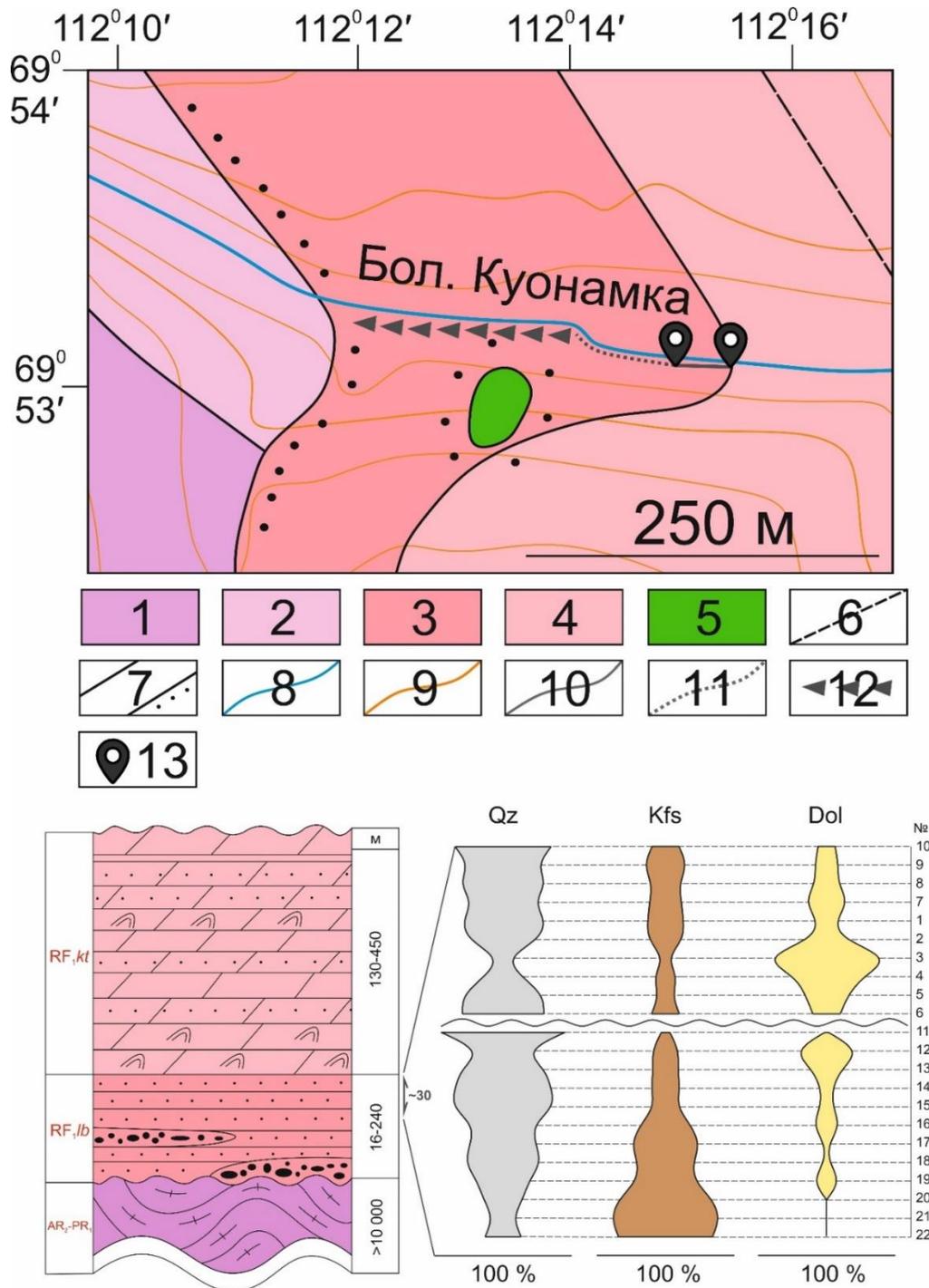


Рис. 4.3. Сверху - карта-схема места отбора образцов с реки Б. Куонамка. Снизу - положение отобранных образцов в стратиграфической колонке и динамика изменения состава сверху-вниз по разрезу. Последняя охарактеризована на основании данных РФА валовых проб. Образцы с р. Дюсун не вынесены в связи с затруднением определения их положения в разрезе.

Условные обозначения: 1 - AR_{2at} (архейская амбардахская толща), 2 - PR_{1bt} (раннепротерозойская билээх-тамахская толща), 3 - RF_{1lb} (лабазтахская свита), 4 - RF_{1kt} (котуйканская свита), 5 - $\gamma\delta\text{-}\gamma\xi PR_{1sl}$ (раннепротерозойский? Нижнехапчанский массив), 6 - разломы предполагаемые, 7 - геологические границы (согласные и несогласные), 8 - реки, 9 - изолинии рельефа, 10 - путь отбора образцов, 11 - затопленная во время сплавных работ 2022 года часть разреза, 12 - курумы, 13 - метки начала и конца пробоотбора.

Qz - кварц, Kfs - калиевые полевые шпаты, Dol - доломит. Сокращенные названия минералов даны по (Warr, 2021).

4.2 Факторный анализ: ассоциации минералов в песчаниках и их интерпретация

Ассоциации минералов выделены на основе данных о количественном минеральном составе тяжелой и легкой фракций протолок образцов песчаников (табл. 1, 2 в приложениях) Эти данные были обработаны методом главных компонент факторного анализа в программе Statistica. Была поставлена задача на основе корреляционных связей выявить ассоциации минералов, сформированные в результате совместного поступления из того или иного источника сноса. Автор исходил из предположения, что общий источник сноса будет обеспечивать корреляционные связи между минералами, поступающими из этого источника. При этом учитывались результаты анализа как валовых проб, так и тяжелой фракции. Из указанных данных избирались минералы, содержания которых устойчиво превышали порог обнаружения. Нужно учитывать, что факторный анализ отражает общие закономерности в изменении минерального состава образцов. Очевидно, что полученные факторы и их структуры можно интерпретировать по-разному, в том числе и как ассоциации минералов, поступающие в осадочную породу из разных источников.

Исходная выборка состояла из 15 проб и включала 6 переменных - 3 из тяжелой фракции и 3 из валовых проб - анатаз (Ant), циркон (Zr), апатит (Ap), кварц (Qz), калиевый полевой шпат (Kfs), доломит (Dol) (табл. 4.1). Результаты факторного анализа приведены в табл. 4.2 и табл. 4.3: рассчитаны факторные нагрузки и значения факторов в соответствующих точках. Предварительно в программе Statistica был составлен график «каменистой осыпи» для выделения достоверных факторов (рис. 4.4).

Критическое значение факторной нагрузки по модулю равно 0.51 (для уровня значимости $\alpha = 0.05$ и объеме выборки $n = 15$). То есть, с надежностью 95 % можно утверждать, что все факторные нагрузки, превышающие по модулю 0.51, являются значимыми; с надежностью 90 % можно утверждать, что все факторные нагрузки, превышающие по модулю 0.42, являются значимыми.

Следует отметить, что это предварительный опыт такого исследования и для дальнейших, более убедительных исследований, необходимо задействовать большее количество материала. Однако для выделения самых общих тенденций и выявления источников сноса указанного количества проб оказалось достаточно.

Из матрицы факторных нагрузок вытекает, что 96 % всей дисперсии системы может быть описано четырьмя факторами (46.7% дисперсии - первый фактор, 24.3 % - второй фактор, 17.1 % - третий фактор и 8 % - четвертый фактор). Эти факторы характеризуются следующими типами элементных композиций:

- 1) Факторы с протагонически связанными признаками - у всех признаков один и тот же знак;
- 2) Факторы с антагоническими ассоциациями элементов - факторная нагрузка одной группы переменных имеет положительный знак, а другой - отрицательный.

Знак факторной нагрузки имеет относительный смысл и указывает на обратную зависимость переменных, отображенных в знаменателе и числителе. Для дальнейших описаний было использовано два первых факторов, так как интерпретация III и IV факторов является довольно спорной при небольшом объеме имеющейся выборки. Можно только сказать, что III и IV фактор являются характерными на анатаз и циркон соответственно.

Таблица 4.1. Исходные данные.

№	Анатаз	Циркон	Апатит	Кварц	К- полевой шпат	Доломит	Положение в разрезе	Обнажение
3	4.3	1.5	1.8	38.6	24.7	33.4	верхи	1
4	1.9	2.4	0.5	26.8	17.8	53.1	центр	1
8	10.4	2.7	2.9	63.8	19.8	16.4	верхи	1
9	2.7	0.5	2.4	49.6	31.8	17	верхи	1
15	3.6	1.8	7.3	74.9	16.2	8.8	низы	1
17	0.2	0.5	3.1	47.3	50.1	2.6	низы	1
22	2.8	0.2	10.4	26.2	68.4	0.2	низы	1
1	1.3	0.8	0.2	60.8	26.1	12.4	верхи	1
2	2	2.4	4	52.9	26.4	20.7	верхи	1
10	1	0.8	1.9	70.2	19.6	10.1	верхи	1
11	4.2	1.3	0.2	90.3	6.3	2.6	центр	1
12	1.6	0.8	2.6	31.2	19.8	48.9	центр	1
21	2	1.4	7.2	14.4	79.2	0.2	низы	1
23	1.3	11.2	0.2	97.8	2.2	0.2	не установлено	2
24	3.4	12.6	0.2	95.8	4.2	0.2	не установлено	2

Таблица 4.2. Факторные нагрузки.

Фактор	I	II	III	IV
Переменная				
Анатаз (Ant)	-0.172153	0.020966	0.976659	0.052260
Циркон (Zrn)	-0.752787	0.297713	-0.135345	0.570507
Апатит (Ap)	0.759988	0.462099	0.201657	0.143283
Кварц (Qz)	-0.897079	0.342953	0.025584	-0.238812
КПШ (Kfs)	0.900111	0.332113	-0.078877	0.102068
Доломит (Dol)	0.119316	-0.961716	0.058173	0.196681
Общ. Дисперсия	2.803094	1.455421	1.023107	0.454871
Доля общ.	0.467182	0.242570	0.170518	0.075812

Красным отмечены нагрузки > 0.51 (значимые факторные нагрузки для выборки из 15 проб для 95 % вероятности), оранжевым - для 90 % вероятности. КПШ - калиевые полевые шпаты

Таблица 4.3. Значения факторов в экспериментальных точках с двух обнажений:
1 - р. Б. Куонамка, 2 - р. Дюсун.

№ пробы	Фактор				Положение в разрезе	Обнажение
	I	II	III	IV		
3-Т	0.16093	-1.06032	0.59599	0.31822	верхи	1
4-Т	0.13658	-2.08591	-0.39398	1.02308	центр	1
8-Т	-0.40191	-0.02397	3.03132	0.14151	верхи	1
9-Т	0.25354	-0.26681	-0.03373	-0.58219	верхи	1
15-Т	0.01690	0.69223	0.64341	-0.47666	низы	1
17-Т	0.63608	0.50497	-1.09396	-0.75754	низы	1
22-Т	1.74913	1.34711	0.32444	0.56138	низы	1
1-Т	-0.15561	-0.26918	-0.72531	-1.17111	верхи	1
2-Т	0.16923	-0.17042	-0.24116	0.14535	верхи	1
10-Т	-0.21223	0.00937	-0.71159	-1.32213	верхи	1
11-Т	-0.93417	0.20892	0.47306	-1.90094	центр	1
12-Т	0.40701	-1.73742	-0.33952	0.52453	центр	1
21-Т	1.70283	1.08177	-0.28833	0.93567	низы	1
23-Т	-1.71461	0.83966	-1.00836	0.96967	не установлено	2
24-Т	-1.81371	0.93001	-0.23229	1.59115	не установлено	2

Собственные значения

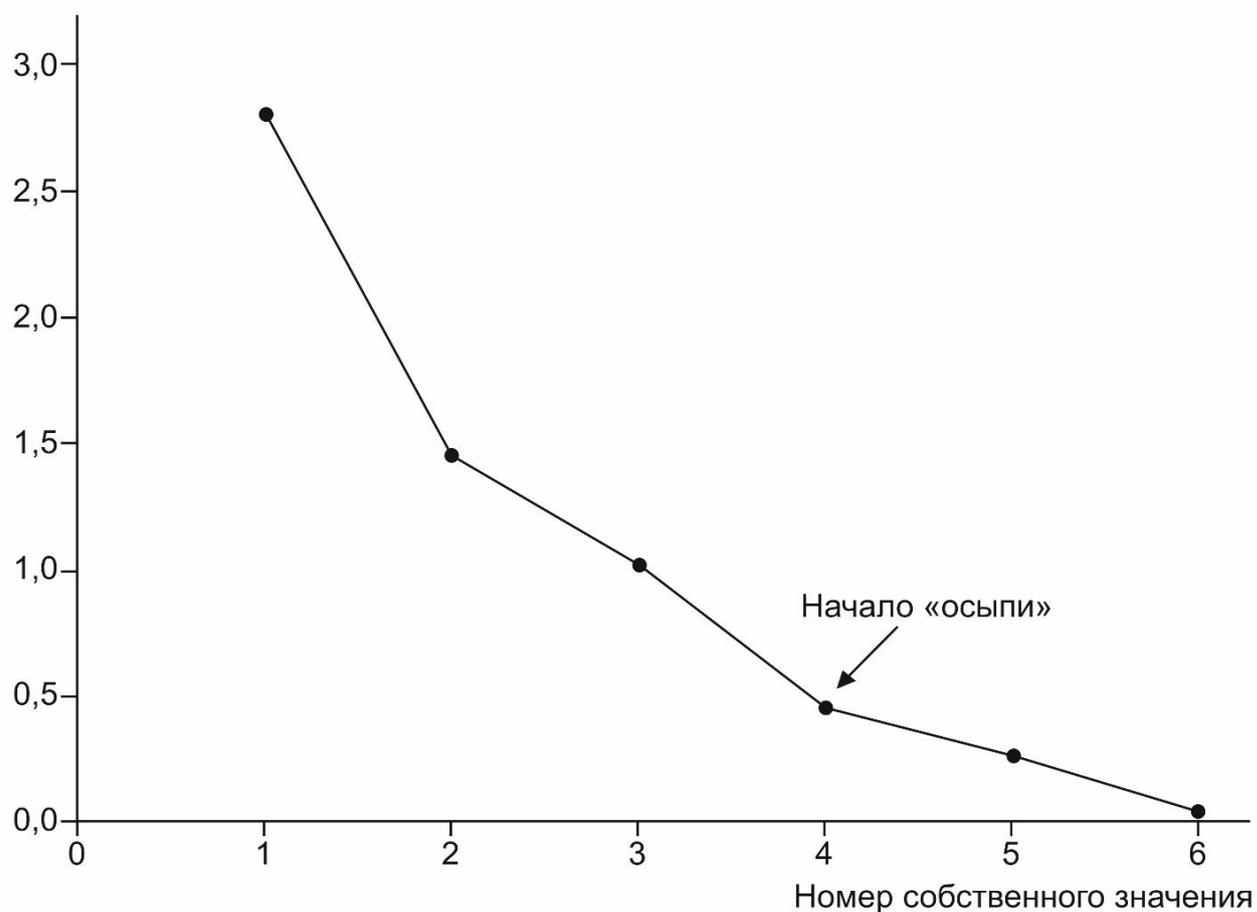


Рис. 4.4. График «каменистой осыпи». Начало «осыпи» указывает на неустойчивость системы, при которой дальнейшее выделение и интерпретация факторов не имеет смысла.

Структуры факторов представлены в соответствии с методом, описанным в работе (Котова Булдаков, 2009) и выглядят следующим образом:

$$I_{47\%} = \frac{Kfs_{90} Ap_{76}}{Qz_{90} Zr_{75}}$$

$$II_{24\%} = \frac{(Ap_{46})}{Do_{196}}$$

$$III_{17\%} = \frac{Ant_{98}}{-}$$

$$IV_{8\%} = \frac{Zrn_{57}}{-}$$

Здесь римская цифра соответствует номеру фактора, число в основании этой цифры - вес фактора (%), над чертой выписаны все переменные, имеющие значимую положительную нагрузку на фактор, под чертой - значимую отрицательную нагрузку; в основании символов переменных - их нагрузки на фактор, умноженные на 100. В скобках указаны переменные, чьи факторные нагрузки близки к значимым, но не превышают их для 95 % вероятности, однако превышают для 90 %.

В факторе I выделилось две антагонистических ассоциации, которые соответствуют двум независимым источникам сноса: 1 - толщи калишпатовых пород с акцессорным апатитом; 2 - в значительной степени кварцевые породы (граниты, кристаллические сланцы, или кварциты) с акцессорным цирконом.

Во II факторе в антагонизме с калишпатовым появляется третий источник, карбонатный, который работает наряду с двумя другими. Важно отметить, что после петрографического изучения, стало понятным, что карбонаты в образцах развиваются в виде цемента, и фиксируют лишь поступление карбонатного вещества при диа- и катагенезе. Факторный анализ здесь отражает исключительно наличие еще одного источника поступления вещества - карбонатного, а петрографические данные указывают на аутигенное происхождение карбонатов, что не позволяет говорить о значительном влиянии размыва карбонатных пород. Однако в шлифах встречаются обломки карбонатных пород, хоть и не в значительном количестве.

Так как пробы были отобраны сверху вниз по разрезу, и их привязка в стратиграфической колонке определена (рис. 4.2), то для дифференциации источников сноса, участвующих в формировании верхней части лабазтахсой свиты, была построена диаграмма значений первого и второго факторов в точках наблюдения (рис. 4.5).

На диаграмме I-II факторов выделилось три поля точек:

1 - точки, соответствующие калишпатовому с апатитом источнику сноса и представляющие собой низы изученной части разреза;

2 - точки, соответствующие существенно карбонатному источнику поступления вещества, но с незначительным участием как кварцевого с цирконом, так калишпатового с апатитом источника сноса; и это существенно центр изученного разреза, отчасти верхи; с учетом петрографических наблюдений, карбонаты изученных образцов формировались как в процессе преобразования осадочного материала (диа- и катагенез), так и за счет карбонатных источников сноса.

3 - точки, соответствующие в значительной степени кварцевому с цирконом источнику сноса, но с участием калишпатового с апатитом источника.

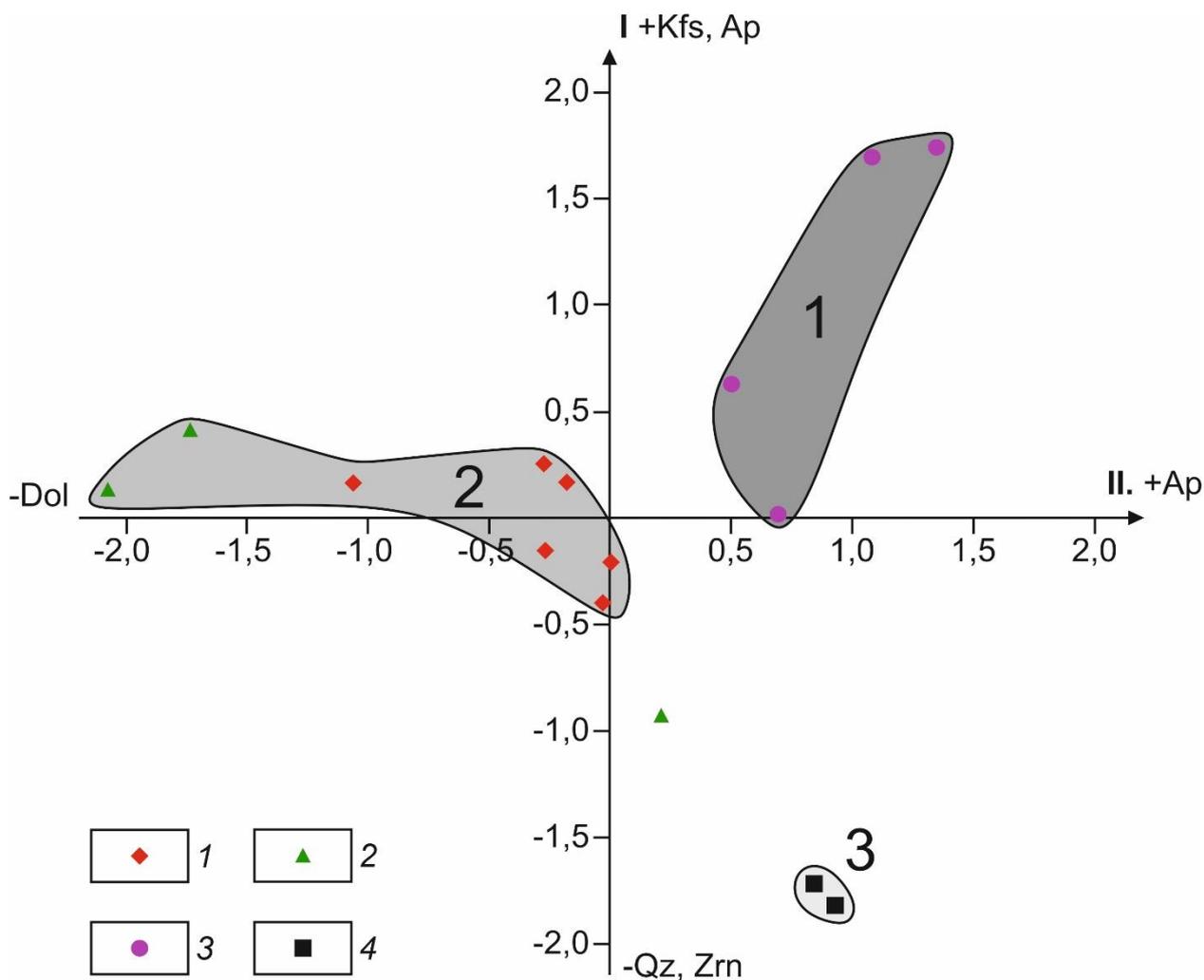


Рис. 4.5. Размещение полей фигуративных точек проб, отобранных вдоль р. Б. Куонамка и р. Дюсун в координатных осях факторов I и II. Количество исходных переменных 6: Ant, Zrn, Ap, Qz, Kfs, Dol. Показательно, что анатаз не участвует в первых двух факторах. Апатит в области положительных переменных по оси абсцисс отмечен для 90 % вероятности, все остальные значения для 95 %.

Условные обозначения: 1 - верхи изученной части разреза (обнажение 1); 2 - центр изученной части разреза (обнажение 1); 3 - низы изученной части разреза (обнажение 1); 4 - положение в разрезе не установлено (обнажение 2). Контурами обведены поля 1, 2, 3 фигуративных точек (пояснения в тексте).

Все точки, соответствующие 3 полю, были отобраны со второго обнажения - по берегу р. Дюсун, и потому их положение в разрезе не было определено. В ассоциации тяжелых минералов указанные пробы имеют среди прочего выявленные по РФА турмалины, которые должны быть также учтены при поиске источников сноса для данных образцов. Следует отметить, что среди пород, отобранных на р. Б. Куонамка, турмалины методом РФА не выявлены (единичные, редкие зерна установлены в шлифах).

В целом, можно сделать вывод, что в формировании изученных пород постоянно участвовали все три источника, но с разной интенсивностью поступления вещества в разные интервалы времени. На ранних этапах ведущую роль играл апатит-полевошпатовый источник сноса, на поздних - карбонатный источник поступления вещества. При этом карбонаты присутствуют как в обломочной фракции, так и в качестве новообразованных минералов. Стоит отметить и ведущее участие преимущественно кварцевых с аксессуарным цирконом пород при формировании песчаников на р. Дюсун.

4.3 Результаты микроскопического изучения шлифов и рентгеноспектрального микроанализа

Разрез рифейских отложений юго-восточной части Восточно-Анабарского бассейна изучался по 22 прозрачно-полированным шлифам образцов песчаников лабазтахской свиты, отобранных с р. Б. Куонамка и р. Дюсун (рис. 3.1). Для систематизации полученных в ходе РФА результатов (табл. 1 в приложениях): пробы были разбиты на 6 групп в зависимости от содержания порообразующих минералов

I группа (содержание кварца 0-25 %, КПШ 75-100 %): проба № 21;

II группа (содержание кварца 25-50 %, КПШ 25-50 %): пробы № 3, 4, 7, 9, 12, 16, 19;

III группа: (содержание кварца 25-50 %, КПШ 50-75 %): пробы № 17, 20, 22;

IV группа: (содержание кварца 50-75 %, КПШ 25-50 %): пробы № 1, 2, 18;

V группа: (содержание кварца 50-75 %, КПШ 0-25 %): пробы № 5, 6, 8, 10, 13, 14, 15;

VI группа: (содержание кварца 75-98 %, КПШ 0-25 %): пробы № 11, 23, 24, 25.

Из каждой такой группы был выбран наиболее представительный шлиф, подробное описание для которого можно найти в приложениях. Для исследования изменений состава в пределах лабазтахской свиты использовались образцы с р. Б. Куонамка в связи с методикой проотбора. Образцы с р. Дюсун не могут охарактеризовать конкретную часть разреза в связи с невозможностью их привязки.

Так верхнюю часть разреза слагают полевошпатовые алевролиты (аркозовые алевролиты) и карбонатные породы. Карбонатные породы (пробы № 3 и 4 в табл. 1 в приложениях) представлены доломитами с терригенной примесью. Результаты исследований РФА для указанных образцов не соответствуют результатам петрографического изучения шлифов, что, скорее всего, отражает сложности в процессе пробоподготовки и попадание в порошок раздробленных полевошпатовых и кварцевых включений. По своим текстурным особенностям указанные пробы напоминают строматолиты (рис. 4.6).

Ниже по разрезу залегают алевритовые мелко-тонкозернистые аркозы (аркозовые песчаники) с карбонатным цементом, полевошпатовые алевролиты (аркозовые алевролиты) и алевритовые как олигомиктовые, так и мезомиктовые тонкозернистые песчаники с карбонатным цементом.

В самой нижней части разреза наблюдаются сильно обогащенные полевыми шпатами алевриты. Образцы с необычно высоким содержанием полевых шпатов (>60 %) составляют примерно 25 % от общей выборки. Стоит отметить, что по результатам РФА все полевые шпаты представлены калиевыми разновидностями, что подтверждается результатами рентгеноспектрального микроанализа и химическим анализом (см.

приложения). Однако признаков привноса калия посредством щелочного метасоматоза (описанного в работах предшественников, Купцова, 2012) в данных образцах не наблюдается.

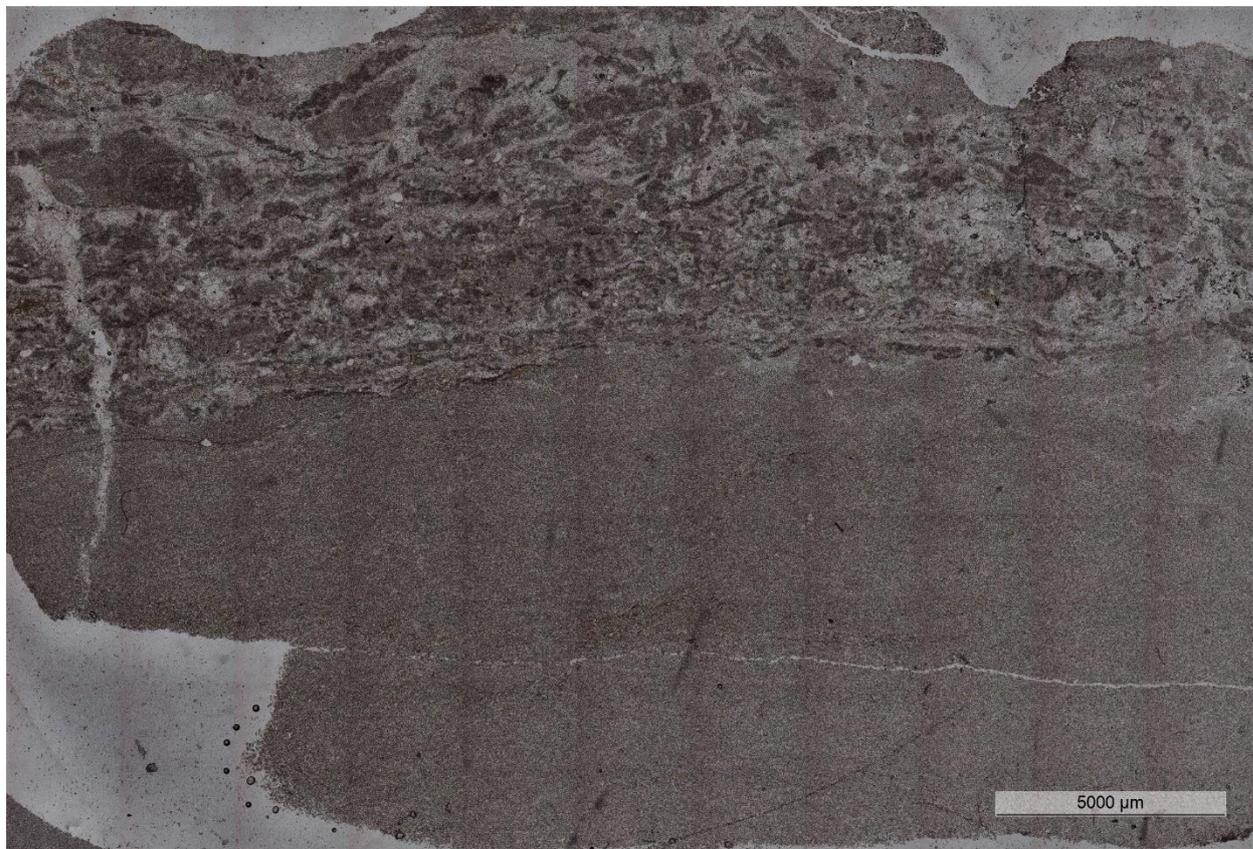


Рис. 4.6. Прозрачно-полированный шлиф, изготовленный из пробы № 3. Доминирующая масса породы представлена карбонатами с терригенной примесью (не более 1 %). Текстурные особенности напоминают строматолит. Николи ||.

В целом, вся изученная толща характеризуется сильной дифференциацией состава и размера слагающих зерен. Каждый отдельно взятый образец имеет специфичные структурные особенности, тип цемента и пористости. Изменение состава и тектонических обстановок формирования песчаных пород лабзтахской свиты в пределах двух обнажений на Куонамской площади проиллюстрированы с помощью диаграмм Петтиджона и Дикинсона (Петтиджон и др., 1976; Dickinson, 1985, рис. 4.7, рис. 4.8). Вышеописанные пробы № 3 и № 4 не участвовали в построении диаграмм из-за несоответствия РФА с петрографическими данными. Так как, судя по петрографическому исследованию, пробы № 3 и № 4 являются карбонатами, а не терригенными породами, то используемая в работе классификация Дикинсона и Петтиджона для них не применима.

Согласно Петтиджону (Петтиджон и др., 1976) фигуративные точки образцов с р. Б. Куонамка попали в области развития аркозов и субаркозов, в то время как все образцы с р. Дюсун тяготеют к кварцевым ареникам; согласно диаграммам Дикинсона (Dickinson, 1985) подавляющее большинство образцов оказалось в полях размыва континентального блока.

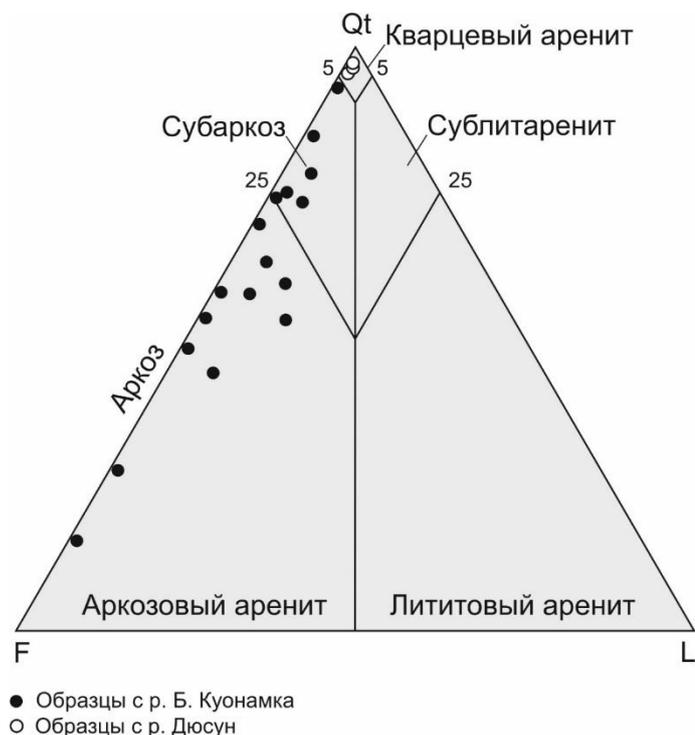


Рис. 4.7. Классификационная диаграмма QFL (Петтиджон и др., 1976) для верхнепротерозойских песчаников юго-восточной части Восточно-Анабарского бассейна.

Условные обозначения: Q - кварц (в том числе и поликристаллический), F - калиевые и натрий-кальциевые полевые шпаты, L - обломки пород.

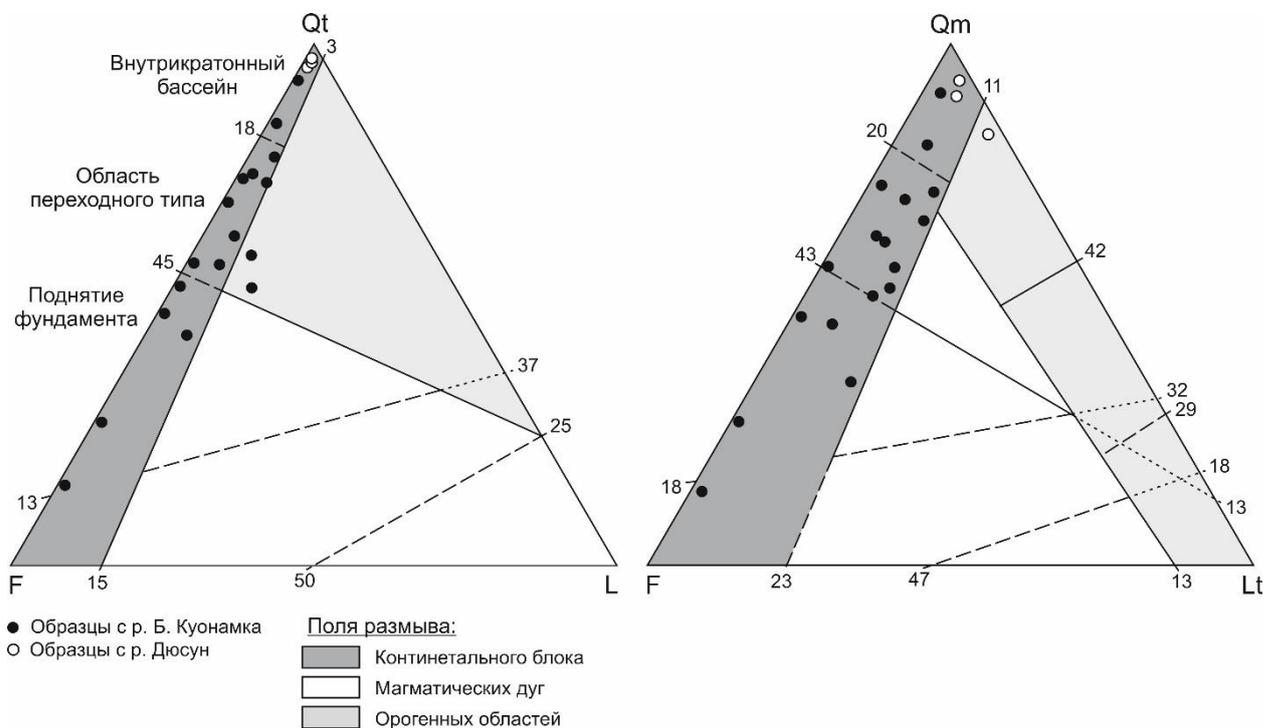


Рис. 4.8. Классификационные диаграммы Дикинсона (Dickinson, 1985) для верхнепротерозойских песчаников юго-восточной части Восточно-Анабарского бассейна.

Условные обозначения: Qt - кварц (в том числе и поликристаллический), Qm - монокристаллический кварц, F - калиевые и натрий-кальциевые полевые шпаты, L - обломки пород (без поликристаллического кварца), Lt - все обломки пород (включая поликристаллический кварц).

Более полные петрографические описания шлифов приведены в приложениях. Основные результаты микроскопических наблюдений сводятся к следующему.

Гранулометрический состав образцов лабазтахской свиты характеризуется довольно плохой сортировкой и в различной степени преобладанием частиц как тонко-мелкозернистой, так и алевролитовой размерности. Среди обломочной фракции, прежде всего, выделяются кварц (15-98 %), КПШ (0-80 %) и обломки пород (не более 15 %). При этом все зерна КПШ имеют алевритовую размерность либо тонкие и потому сложно диагностируемые, в то время как зерна кварца демонстрируют широкую вариабельность в своем размере. Мелкие-средние зерна кварца часто имеют среднюю или 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, зрелость терригенных пород вверх по разрезу возрастает.

Кварц наиболее чистый по сравнению с остальными зернами, характеризуется белыми-серыми цветами интерференции и облачным либо волнистым погасанием. Часто можно встретить кварцевый регенерационный цемент. В некоторых шлифах зерна трещиноватые (рис. 4.9). Выделяются как моно-, так и поликристаллические разновидности.

Калиевые полевые шпаты узнаются по обилию окислов железа, проявляющегося в виде бурого налета. Окислы-гидроокислы развиваются, возможно, по небольшим кавернам (Ulmer-Scholle et al., 2014), которые являются результатом выветривания. При этом полевые шпаты могли окисляться и разлагаться с образованием глинистых минералов с примесью железа как в процессе транспортировки, сопровождающейся разрушением, так и на месте седиментации в процессе эпигенеза при охлаждении минералов (Deer et al., 1963) или привноса железистых растворов. Однако встречаются зерна не подверженные разложению. Они имеют микроклиновую решетку с затухающими двойниками (рис. 4.9). Для КПШ также характерен регенерационный цемент, состоящий из того же вещества, что и сами зерна. Отличительной особенностью регенерационного цемента в данном случае является стадийность его образования. Цемент образовывался после окисления, так как на его поверхности не встречаются пленки окислов железа. Кроме того, КПШ часто характеризуются внутризерновой пористостью, проявленной в виде пустот в центре многих зерен (рис. 4.9).

Среди обломков пород больше всего распространены кварциты и микрокварциты, представленные поликристаллическим кварцем. Значительно реже встречаются единичные обломки кремнистых пород, узнающиеся по желтоватой, характерной для халцедона окраске в скрещенных николях, и обломки карбонатных пород, которые выделяются по

округлой форме и микрокристаллическому строению. Однако в породах с большим количеством карбонатного цемента диагностировать данные обломки весьма трудно.

Образцы довольно пористые. Присутствует несколько типов пор: выщелачивания, межзерновая и внутризерновая. Это говорит о том, что в изученных образцах могло происходить последовательное избирательное выщелачивание в зависимости от химизма поступающих растворов (Жуковская, 2019). Так при поступлении щелочных растворов из образцов «выпадал» кварц, при поступлении кислых происходило растворение карбонатного цемента и выщелачивание зерен полевых шпатов (Жуковская, 2019; Логвиненко, 1984). Возможно, сначала растворялся карбонатный цемент, а образующиеся пустоты «залечивались» регенерационными каемками кварцевых зерен.

Из акцессорных минералов отмечаются магнетит, монацит, апатит, рутил, единичные зерна турмалина и циркон, часто характеризующийся зональным строением (рис. 4.10).

Для более детальной диагностики акцессорных включений, а также доказательства сильного доминирования неустойчивых полевых шпатов над кварцем в нескольких изучаемых образцах использовался метод рентгеноспектрального микроанализа. Результаты анализа приведены ниже (рис. 4.11, рис. 4.12, рис. 4.13).

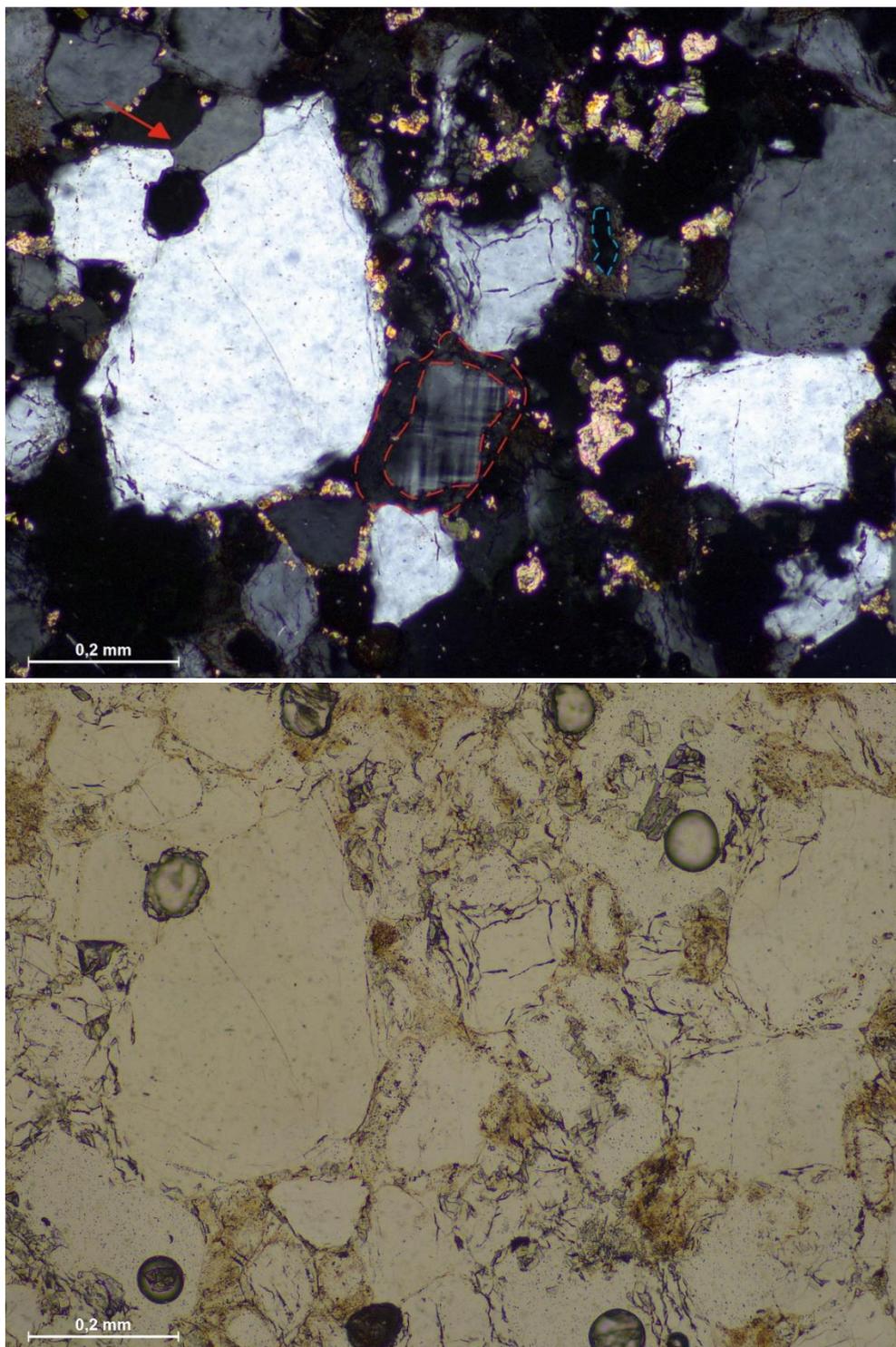


Рис. 4.9. Шлиф 84. На рисунке видны трещиноватые зерна кварца. Красным пунктиром отмечен полевошпатовый регенерационный цемент, синим - внутризерновая пористость полевых шпатов. Стрелка указывает на ровные грани кварца, образованные при регенерации на стадии катагенеза. Сверху - николи \times , снизу - николи \parallel .

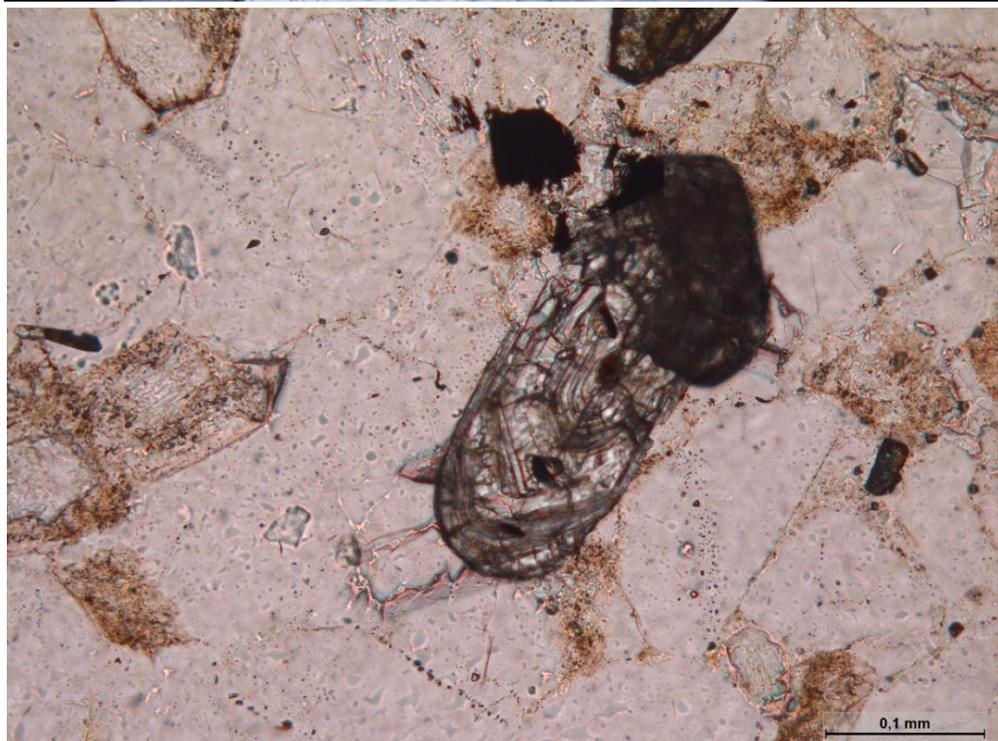
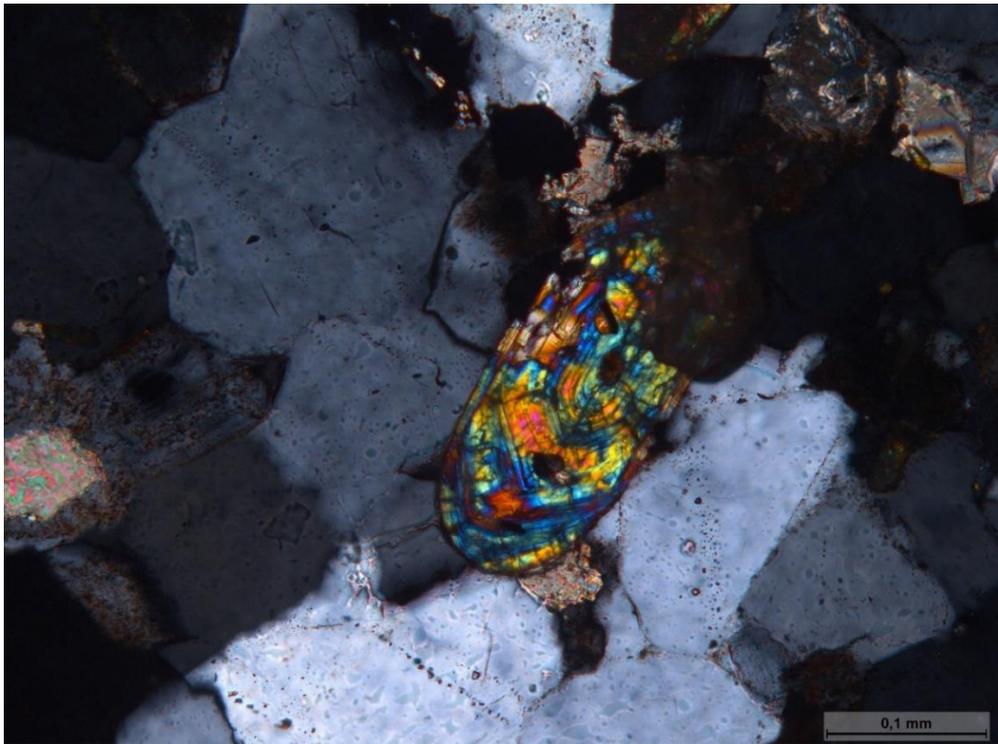
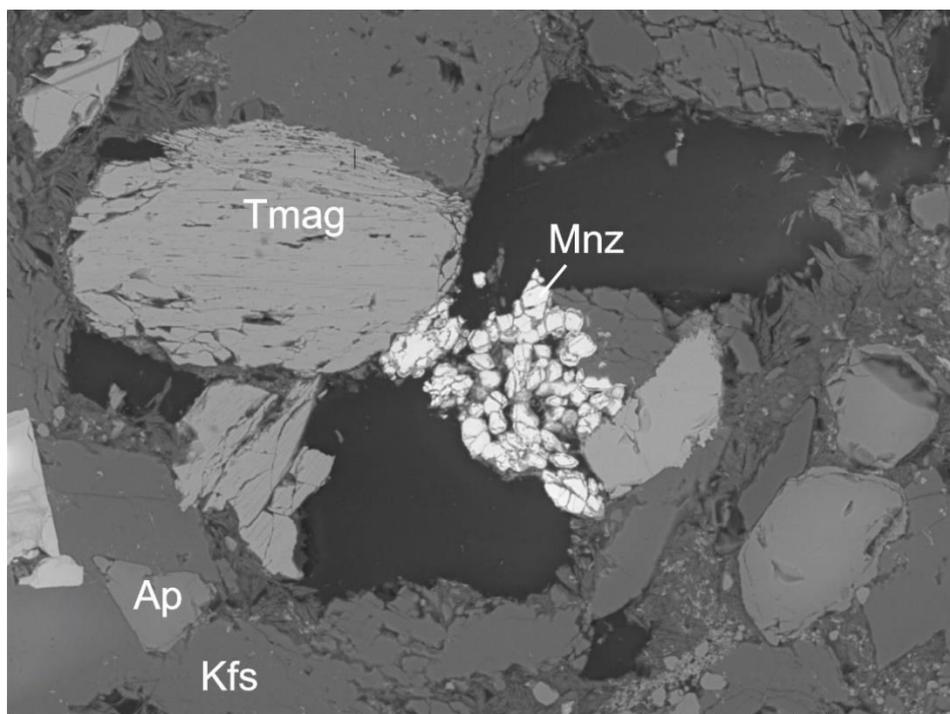
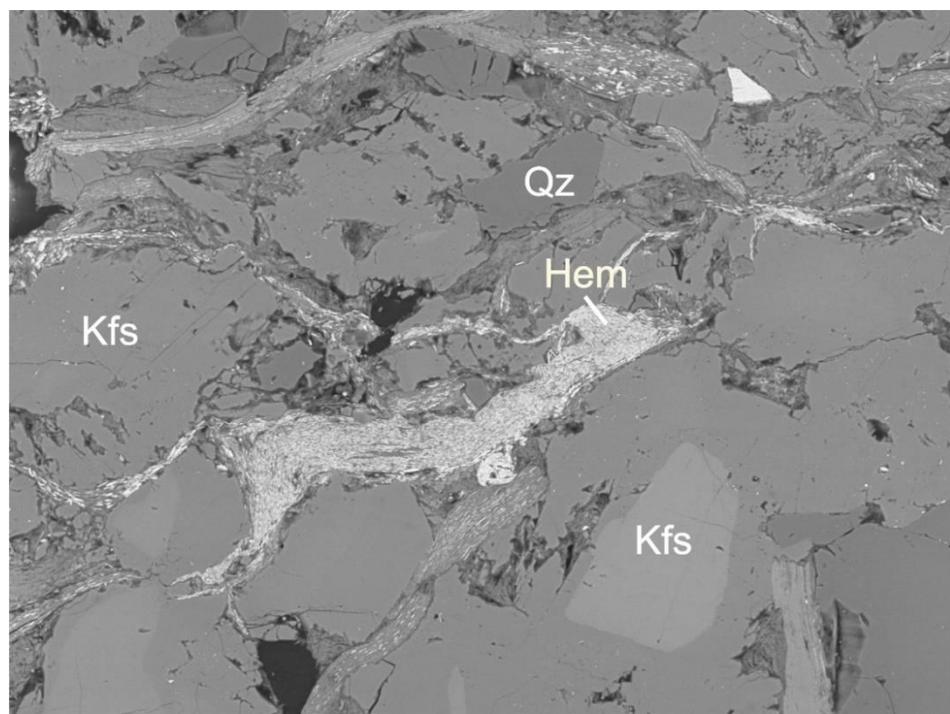


Рис. 4.10. Обломочный циркон с характерным зональным строением.
Сверху - николи \times , снизу - николи \parallel .



116-0002 2023/03/15 HL D6.8 x600 100 um

Рис. 4.11. Результат рентгеноспектрального микроанализа шлифа 116 (в таблице РФА представлен под номером 21), участок с рудными минералами. Tmag - титаномагнетит, Mnz - монацит, Ap - апатит, Kfs - калиевый полевой шпат. Сокращенные названия минералов даны по (Warr, 2021).



116-0002 2023/03/15 HL D6.8 x400 200 um

Рис. 4.12. Результат рентгеноспектрального микроанализа шлифа 116 (в таблице РФА представлен под номером 21), участок с рудными минералами и лимонитовым цементом. Qz - кварц, Kfs - калиевый полевой шпат, Hem - гематит. Сокращенные названия минералов даны по (Warr, 2021).

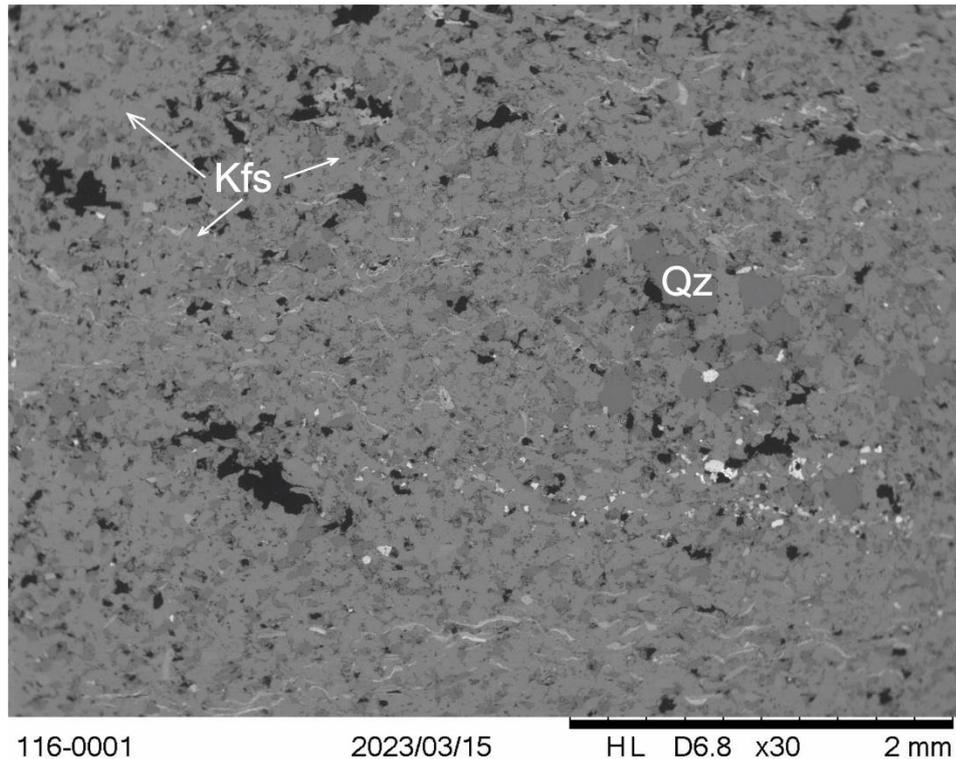


Рис. 4.13. Результат рентгеноспектрального микроанализа шлифа 116 (в таблице РФА представлен под номером 21), общий вид. Стрелочками обозначены светло-серые участки развития полевых шпатов. Обломочные зерна кварца имеют более темные тона. Светло-белые минералы являются рудными (в основном титаномагнетит). Обратите внимание на доминирование полевых шпатов над кварцем. Также характерна неравномерно распределенная пористость. Наблюдаются межзерновые и поры выщелачивания, последние из которыхкратно больше терригенных компонентов. Kfs - калиевые полевые шпаты, Qz - кварц. Сокращенные названия минералов даны по (Warr, 2021).

4.4 Результаты изотопных исследований

Для изотопных исследований использовались образцы, отобранные с р. Дюсун. Обнажение представляет собой коренной выход и песчаников и слагает небольшой уступ с видимой мощностью 1.5-2 м, что позволило отобрать необходимое количество материала для выделения обломочных цирконов. Все образцы неветерельные, чистые, в отличие от образцов с р. Б. Куонамка.

Всего было продатировано 69 зерен, в 60 из которых дискордантность менее 10% (рис. 4.14). Возраста этих зёрен лежат в интервале 1800-3000 млн лет. Средневзвешенный возраст самых молодых цирконов, образующих наиболее значительный пик на KDE диаграмме, составил 1965 ± 11 млн лет (рис. 4.14, 4.15). Средневзвешенный возраст второго значимого кластера цирконов составил 2749 ± 15 млн лет (рис. 4.14, 4.15). Средневзвешенные значения для двух выделяющихся популяций цирконов рассчитывались через вкладку «U-Pb» и «weighted mean» в программе IsoplotR после предварительного сокращения общей выборки. Значения для построения KDE выбраны по умолчанию в связи с недостаточно представительной, но единственно возможной выборкой.

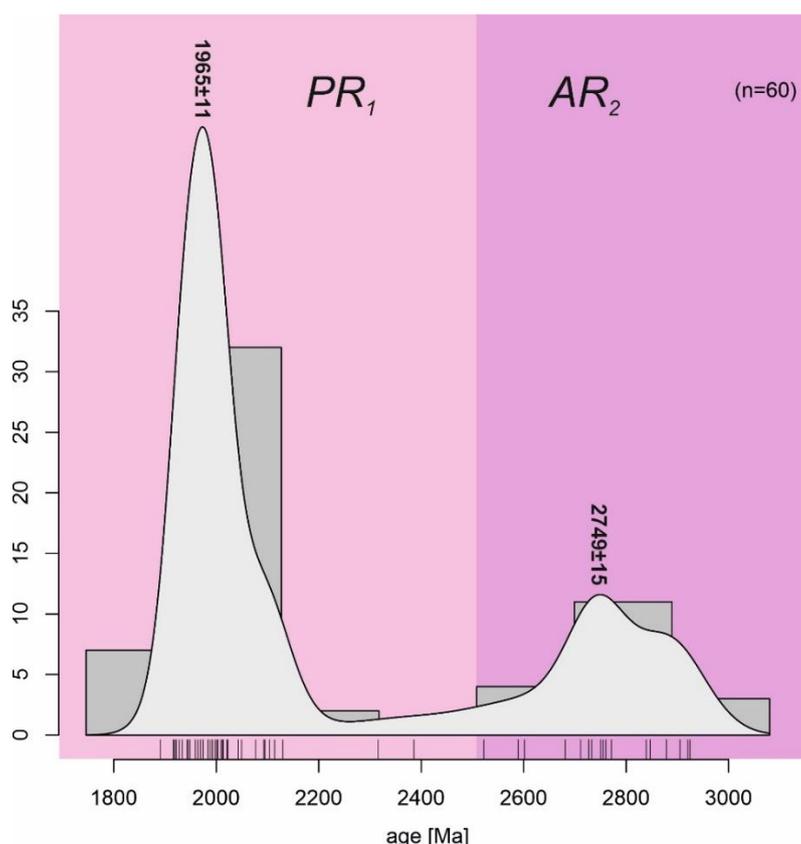


Рис. 4.14. Диаграмма KDE со средневзвешенными значениями основных пиков по данным обломочных цирконов из образцов песчаников лабазтахской свиты с р. Дюсун. По оси x - возраст зерна, по оси y - количество зерен, n - количество конкордантных значений, принятых для построения. Выбранные параметры: kernel bandwidth = auto, histogram binwidth = auto.

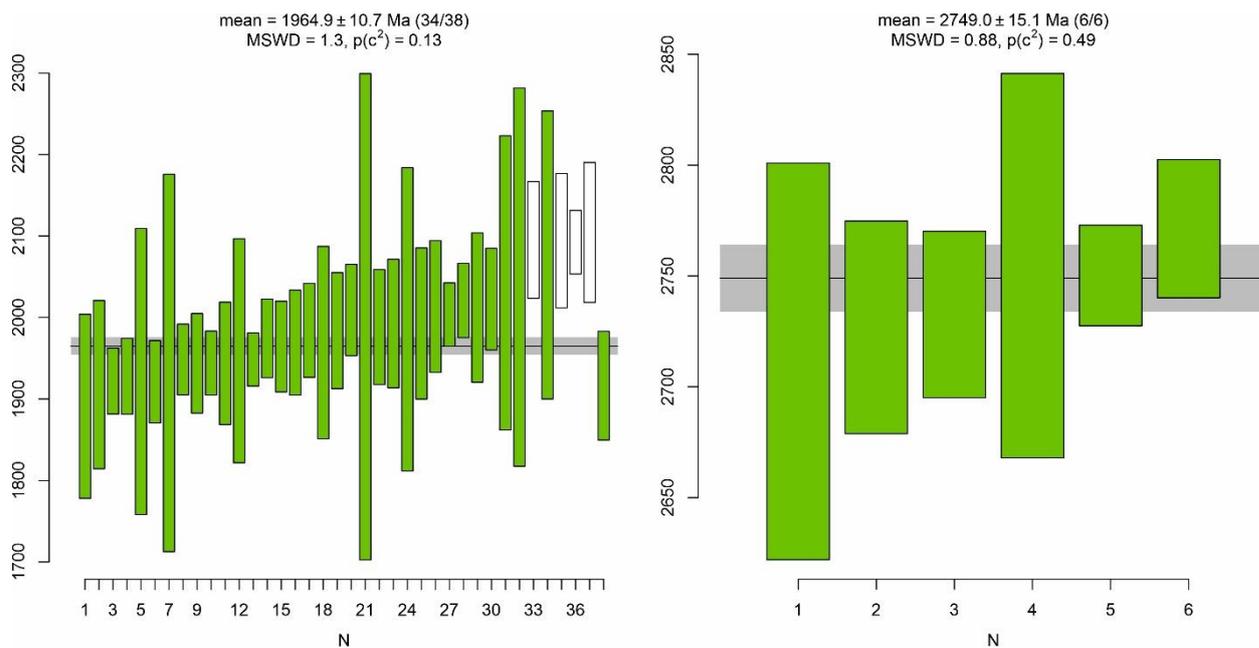


Рис. 4.15. Средневзвешенные значения для самой молодой популяции цирконов (слева) и наиболее древней (справа). Некоторые значения исключены для того, чтобы пройти тест на p-value.

Обсуждение результатов и выводы

Рентгенофазовый анализ валовых проб и петрографический анализ шлифов позволили установить, что вверх по разрезу породы становятся более зрелыми. Это указывает на более длительный перенос поставляемого материала или перемыв в пределах приливно-отливной зоны, но не исключено и влияние размыва новых источников с большим количеством кварца. Стоит отметить и увеличение содержания карбонатов вверх по разрезу. Можно предположить, что сначала в непосредственной близости от источника сноса в бассейн седиментации поступал терригенный, преимущественно полевошпатовый материал, который постепенно сменялся кварцевой составляющей, фиксирующей смену обстановки накопления с континентальной на приливно-отливную, т.е. прибрежно-морскую. В мелководном море развивались бактериальные сообщества - строматолиты. При этом продолжился речной сток с терригенной седиментацией, на что указывают обломочные зерна кварца и полевых шпатов в верхней части разреза. В конце раннего рифея речной сток окончательно прекратился, что выразилось в накоплении строматолитовых карбонатов котуйканской свиты. Помимо этого, рентгенофазовый анализ установил, 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, характерного для калиевых разностей (Лодочников, 1974).

Буроватый налет детально изучался с помощью рентгеноспектрального микроанализа. Результаты анализа позволили установить, что пленки на полевых шпатах и цементирующая масса между терригенными зернами представлена окислами железа. При этом в трещинах пластинки гематита несут признаки метасоматоза, замещая биотит по спайности, и ориентируются в одном направлении, свидетельствуя об одностороннем давлении, воздействующем на породы.

Петрографическое изучение шлифов позволило заключить следующее. Терригенные породы с р. Б. Куонамка и р. Дюсун сильно дифференцированы по составу - от калиевых аркозов до кварцевых песчаников соответственно. Породы с р. Б. Куонамка характеризуются сильным разбросом по содержанию полевых шпатов и кварца. Среди них на диаграмме Петтиджона (рис. 4.7) выделяется несколько образцов, тяготеющих к полям развития как аркозовых, так и кварцевых аренитов. Для аркозовых аренитов значительное обогащение полевошпатовой составляющей следует связывать, прежде, всего с близостью коренных высокополевошпатовых пород, так как явных признаков гидротермально-метасоматического происхождения в шлифах не наблюдается. Образцы, отобранные с р. Дюсун, однородны по своему составу и являются наиболее зрелыми среди всех изученных

пород мукунской серии. На диаграмме Петтиджона они попадают в поля кварцевых аренитов с небольшой примесью полевых шпатов (<5 %).

Интерпретация диаграмм Дикинсона (рис. 4.8) указывает на разрыв континентального блока, в основном устойчивого или переходного типа. Область переходного типа подразумевает слабую тектоническую активность и наличие небольших вертикальных движений по разломам, что теоретически может соответствовать обстановке на краях рифтовых систем. Отсутствие плагиоклазов также говорит об областях спокойного тектонического режима (Dickinson, 1985). Полученные в ходе работы результаты являются дополнением к немногочисленным сейсмическим данным по изученной территории (Сурков, 2002) и могут быть еще одним свидетельством пространственной приуроченности Восточно-Анабарского бассейна к Хастахско-Уджинскому авлакогену.

Сильное разложение полевых шпатов говорит о гумидном климате при формировании пород мукунской серии. Наличие пористости разных типов, в том числе и выщелачивания, свидетельствует о развитых вторичных преобразованиях и воздействиях растворов разного химизма, последние из которых способствовали выщелачиванию карбонатов и, возможно, терригенных зерен кварца или полевых шпатов.

Факторный анализ выделяет два явных источника сноса с устойчивыми корреляционными связями между слагающими их минералами: калишпатовый с акцессорным апатитом и кварцевый с акцессорным цирконом и турмалином. На основании имеющихся данных источники сноса могут быть представлены кварцитами, интрузиями кислого состава, а также отдельными интрузивными телами повышенной щелочности. Помимо областей сноса по факторному анализу выделяется источник поступления карбонатного вещества. Сами карбонаты в шлифах встречаются преимущественно в виде цемента. Чтобы понять происхождение цемента - диа- или катагенетический, необходимы дополнительные исследования (анализ стабильных изотопов углерода и кислорода), что может стать предметом дальнейших исследований. Сейчас же судить об этапе литогенеза, при котором был сформирован цемент, затруднительно. При диагенетическом происхождении источником вещества могли быть седиментогенные воды. Учитывая тот факт, что при просмотре шлифов встречаются коррозионные участки, цемент может быть катагенетическим; в этом случае цемент сформировался благодаря воздействию щелочных горячих флюидов, и их источники могут быть разные. В данном случае полученные результаты будет логичнее рассматривать как наличие обратной зависимости в содержании карбонатов и КПШ в центральной части и верхах изученного разреза. Так или иначе, в шлифах встречаются и обломки карбонатных пород, хоть и в незначительном количестве. Они имеют округлую либо уплощенную форму и характеризуются микрокристаллическим

строением. Это свидетельствует о наличии среди источников сноса и карбонатных пород, однако их вклад в формирование песчаников незначительный.

Распределение возрастов обломочных цирконов фиксирует наличие магматических цирконов с возрастом далеким от времени накопления осадков, тем самым отражая отсутствие синседиментационной магматической активности, что характерно для зоны относительно стабильного развития (Cawood et al., 2012). Средневзвешенные значения возрастов наиболее значимых популяций цирконов из образцов песчаников лабазтахской свиты, венчающей мукунскую серию, с р. Дюсун составили 1965 ± 11 и 2749 ± 15 млн лет, что соответствует известным в пределах Анабарского массива магматическим и метаморфическим событиям (Гусев, 2013; Сергеева, 2021). Однако ильинская свита, начинающая разрез мукунской серии на западе, имеет намного более молодой возраст (моложе 1681 ± 21 млн лет, Khudoley et al., 2015). Это говорит о том, что в формировании песчаников изученного региона не были задействованы более молодые источники сноса. Вероятнее всего, материал для формирования рассматриваемых в работе терригенных пород мог поступать в результате размыва пород, входящих в комплексы архейских пород Маганского и Далдынского кратонов, и преимущественно раннепротерозойских толщ в пределах Хапчанского пояса, перекрывающего Биректинский кратон.

Суммируя результаты проделанной работы, можно сделать следующие выводы:

1. Климат при осадконакоплении был гумидным - это подтверждается сильным разложением практически всех калиевых полевых шпатов с образованием пленок гематита;
2. Доминирование полевых шпатов над кварцем в ряде образцов, плохая-средняя окатанность терригенных зерен во всех изученных образцах говорят о коротких потоках с суши и местном происхождении образцов, зерна алевритовой размерности - о слабой гидродинамики, а знаки ряби, наблюдаемые в обнажениях, - о мелководной обстановке;
3. Накопление терригенных пород происходило в относительно стабильной обстановке тектогенеза при размыве континентального блока преимущественно переходного типа, то есть с небольшими вертикальными движениями по разломам;
4. По факторному анализу выделяется два источника сноса: КПШ-породы с апатитом и кварцевые с цирконом и турмалином.
5. Породы, поставляющие материал для формирования песчаников, имеют возраст 1.965 и 2.750 млрд лет. Полученным датировкам соответствуют распространенные в пределах Анабарского массива магматические и метаморфические события данного времени. Теоретически источниками сноса могут служить следующие магматические комплексы: Маганский и Билляхский, соответствующие возрасту 2.0-1.9 млрд лет, и

Анабарский, отвечающий возрасту 2.7-2.8 млрд лет. Метаморфические комплексы возраста 1.9 млрд лет могут быть представлены гранулитами и измененными гнейсами хапчанской серии, а также гранитизированными породами верхнеанабарской и далдынской серий.

Список литературы

Опубликованная:

1. Веселовский Р. В., Павлов В. Э., Петров П. Ю. Новые палеомагнитные данные по Анабарскому поднятию и Учуро-Майскому району и их значение для палеогеографии и геологической корреляции рифея Сибирской платформы // Физика Земли. - №7. - 2009. - Москва. - С. 3 -24.
2. Герасимов Б. Б., Никифорова З. С., Павлов В.И. Минералого-геохимические особенности золота россыпи р. Большая Куонамка // Наука и образование. - 2014. - №3. - 5 с.
3. Горохов И.М., Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Васильева И.М., Ризванова Н.Г., Липенков Г.В., Дубинина Е.О. Раннерифейская билляхская серия Анабарского поднятия, Северная Сибирь: изотопная С-О геохимия и Pb-Pb возраст доломитов // Стратиграфия. Геологическая корреляция. - 2019. - Т. 27. - № 5. - С. 19-35
4. 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. Rb- Sr и K-Ar возраст осадочных геохронометров нижнего рифея Анабарского массива // Изв. АН СССР: Сер. геол. - 1991. - № 7. - С. 17-32.
5. Гусев Н. И. Анабарский щит Сибирского кратона. Вещественный состав, геохимия, геохронология. Saarbrucken: LAP Lambert Academic Publishing, 2013. - 189 с.
6. Жуковская Е. А. Генетическая интерпретация фильтрационно-емкостных свойств терригенных пород-коллекторов: практическое пособие. - М. - Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2019. - 160 с.
7. Зайцева Т.С., Семихатов М.А., Горохов И.М., Сергеев В.Н., Кузнецов А.Б., Ивановская Т.А., Мельников Н.Н., Константинова Г.В. Изотопная геохронология и биостратиграфия рифейских отложений Анабарского массива, Северная Сибирь // Стратиграфия. Геологическая корреляция. - 2016. - Т. 24. - № 6. - С. 3-29.
8. Котова И. К., Булдаков И. В. Факторный анализ при исследовании геологических систем. Элементарные основы факторного анализа. Принципы интерпретации его результатов: учебно-методическое пособие. - 2-е изд., доп. и испр. - СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет, 2009. - 48 с.
9. Купцова А. В., Худолей А. К., Дэвис В., Рейнбирд Р. Х., Молчанов А. В. Результаты U-Pb датирования обломочных цирконов из верхнепротерозойских отложений восточного склона Анабарского поднятия // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2015. - Т. 23. - № 3. - С. 13-29.

10. Логвиненко Н.В. Петрография осадочных пород (с основами методики исследования) / Изд. «Высшая Школа». - Москва. - 1984. - 416 с.
11. Молчанов А.В., Терентьев В.М., Ефимов С.А. Перспективы ураноносности Анабарского щита // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. - 2001. - Вып. 143. - С. 62-68.
12. Петтиджон Ф., Поттер П., Сивер Р. Пески и песчаники. - М.: Мир, 1976. - 535 с.
13. Розен О. М., Левский М. К., Журавлев Д. З., Ротман А. Я., Специус З. В., Макеев А. Ф., Зинчук Н. Н., Манаков А. В., Серенко В. П. палеопротерозойская аккреция на северо-востоке Сибирского кратона: изотопное датирование Анабарской коллизионной системы // Стратиграфия. Геологическая корреляция. - 2006. - Т. 14. - № 6. - С. 3-24
14. Сидоренко А. В. Геология СССР. Т. XVIII, Западная часть Якутской АССР, Ч. 1. Геологическое описание. Кн. 1. Коллектив авторов. М.: Изд-во «Недра». - 1970. - 536 с.
15. Сурков В. С. Структура литосферы осадочных бассейнов Сибири и их нефтегазоносность // Литосфера. - 2002. - № 1. - С. 23-36
16. Штольц А.К., Медведев А.И., Курбатов Л.В. Рентгеновский фазовый анализ: учебно-методическое пособие. - Екб.: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2005. - 24 с.
17. Cawood P.A., Hawkesworth C.J., Dhuime B. Detrital zircon record and tectonic setting // *Geology*. - 2012. - V. 40. - № 10. - P. 875-878
18. Deer W. A., Howie R. A., Zussman J. Rock-forming minerals. V. 4. Framework Silicates. London. 1963. 404 p. / переведено с английского: Смолина П. П., Соболева С. В., Финько В. И. Породообразующие минералы. Каркасные силикаты. - Т.4. - Мск: изд. «Мир». - 1966. - 404 с.
19. Dickinson W.R. Provenance of arenites / edited by G. G. Zuffa // NATO ASI Series. Series C: Mathematical and Physical Sciences. - 1985. - V. 148. - P. 333-361
20. Ernst R.E., Buchan K.L., Hamilton M.A., Okrugin A.V., Tomshin M.D. 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 // *Journal of Geology*. - 2000. - V.108. - P. 381-401
21. 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. Southern Siberia and northern Laurentia: neighbours for a quarter of Earth's history // *Nature Geosciences*. - 2016. - V. 9 (6). - P. 464-469

22. Gehrels G. Detrital zircon U-Pb geochronology: current methods and new opportunities // *Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances*. Chapter 2. Blackwell Publishing Ltd. - 2012. - P. 47-62
23. Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Pisarevsky S.A., Ernst R.E., Soderlund U., Kotov A.B., Kovach V.P., Okrugin A.V. 1.79-1.75 Ga mafic magmatism of the Siberian craton and late Paleoproterozoic paleogeography // *Precambrian Research*. - 2022. - V. 370 (106557)
24. 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. Proterozoic supercontinental restorations: constraints from provenance studies of Mesoproterozoic to Cambrian clastic rocks, eastern Siberian Craton // *Precambrian Research*. 2015. - V. 259. - P. 78-94.
25. Khudoley, A.K., Kropachev, A.P., Tkachenko, V.I., Rublev, A.G., Sergeev, S.A., Matukov, D.I., Lyahnitskaya, O.Yu. Meso- to Neoproterozoic evolution of the Siberian craton and adjacent microcontinents: an overview with constraints for Laurentian connection. In: Link, P.K., Reed, S.L. (Eds.), *Proterozoic Geology of Western North America and Siberia*, 86. SEPM Special Publication, 2007. - P. 209-226.
26. Smelov, A.P., Timofeev, V.F. The age of the North Asian Cratonic Basement: An Overview // *Gondwana Research*. 2007. - V. 11. - P. 279-288
27. Ulmer-Scholle Dana S., Scholle Peter A., Schieber Juergen and Raine Robert J. A. *Color Guide to the Petrography of Sandstones, Siltstones, Shales and Associated Rocks* // American Association of Petroleum Geologist. - Edition: Memoir 109. - 2014. - 544 p.
28. Warr Laurence N. IMA-CNMNC approved mineral symbols // *Mineralogical Magazine*. - 2021, 85. - P. 291-320

Фондовая

1. Брюховецкий О. С., Мастепанов Н. И., Шаров Г. Н. и др. Геологический отчёт по объекту № 1-30/11 «Обоснование золотоносности протерозойских конгломератов Анабарского щита и его обрамления». Отчёт по контракту с Государственным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Российским государственным геологическим университетом» (РГГРУ) от 01.06.2011. - Москва, 2011. - 266 с.
2. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Анабарская. Листы R-49-XXIII, XXIV. Об. Записка. Сост. Б. Г. Лопатин, С. М. Табунов. - М. 1963. 40 с.
3. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200 000 (1963). Серия Анабарская. Листы R-49-XXIII, XXIV. Сост. Б. Г. Лопатин, С. М. Табунов. - М. 1965.

4. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000, Анабаро-Виллюйская серия, лист R-49. Сост. Гусев Н. И., Пушкин М. Г. - СПб: картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2016

5. Купцова А. В., Особенности строения и эволюция рифейских ураноносных бассейнов: Пашско-Ладожского, Восточно-Анабарского и Атабаска. Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 2012. - 160 с.

6. Сергеева Л. Ю. Состав и изотопно-геохимическая характеристика циркона из гранулитов далдынской серии Анабарского щита. Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», 2021. - 183 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 1. Количественный фазовый состав валовых образцов (вес. %) по данным полнопрофильного анализа (метод Ритвельда).

	1-вал	2-вал	3-вал	4-вал	5-вал	6-вал	7-вал	8-вал	9-вал	10-вал	11-вал	12-вал
Кварц	60.8	52.9	38.6	26.8	59.4	59.3	44.8	63.8	49.6	70.2	90.3	31.2
К-полевой шпат	26.1	26.4	24.7	17.8	9.7	20.1	23.1	19.8	31.8	19.6	6.3	19.8
Доломит	12.4	20.7	33.4	53.1	30.8	20.1	32.1	16.4	17.0	10.1	2.6	48.9
Хлорит												
Слюда (мусковит и/или биотит)	следы		2.4	2.1					1.6			
Магнетит												
Анатаз						следы	следы				следы	
Пирит			следы	следы	следы							
Кальцит												
$R_p, \% (*)$	8.3	5.8	6.5	6.6	6.7	7.4	4.8	5.7	5.9	5.1	6.7	4.9

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

Таблица 1 (продолжение). Количественный фазовый состав валовых образцов (вес. %) по данным полнопрофильного анализа (метод Ритвельда).

	13-вал	14-вал	15-вал	16-вал	17-вал	18-вал	19-вал	20-вал	21-вал	22-вал	23-вал	24-вал	25-вал
Кварц	61.3	70.1	74.9	43.0	47.3	55.9	37.8	28.4	14.4	26.2	97.8	95.8	97.5
К-полевой шпат	17.6	21.1	16.2	37.0	50.1	40.2	41.6	69.1	79.2	68.4	2.2	4.2	2.5
Доломит	21.0	8.1	8.8	20.0	2.6	3.2	20.4	1.3					
Хлорит		следы								1.3			
Слюда (мусковит и/или биотит)										1.4			
Магнетит		следы				следы		следы	следы				
Анагаз		следы				следы	следы						
Пирит	следы	следы			следы	следы	следы	следы	следы				
Кальцит		следы	следы										
Гематит									6.3	2.7			
$R_p, \% (*)$	6.4	5.6	5.9	5.1	4.2	6.5	6.2	3.8	3.1	5.5	5.7	6.3	6.3

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

Таблица 2. Количественный фазовый состав тяжелой фракции образцов (вес. %) по данным полнопрофильного анализа (метод Ритвельда).

	3-Т	4-Т	8-Т	9-Т	15-Т	17-Т	22-Т
Кварц	10.9	5.1	7.3	8.4	3.7	3.8	5.7
Гематит	31.4	49.6	48.5	31.4	34.9	45.8	46.7
Доломит	34.3	30.2	21.9	36.2	40.0	следы	23.8
К-полевоы шпат	9.9	5.4	4.9	12.0	6.5	11.6	8.4
Альбит	2.0	следы	следы	-	-	2.5	-
Анаказ	4.3	1.9	10.4	2.7	3.6	-	2.8
Циркон	1.5	2.4	2.7	следы	1.8	следы	-
Апатит	1.8	следы	2.9	2.4	7.3	3.1	10.4
Слюда (мусковит и/или биотит/флогопит)	3.9	3.7	-	-	-	6.6	следы
Ильменит	-	-	1.4	-	-	8.0	-
Силлиманит	-	-	-	следы	2.2	-	-
Магнетит	-	-	-	следы	следы	3.2	следы
Гранат (альмандин)	-	-	-	6.2	-	-	1.3
Хлорит	-	-	-	-	-	9.1	следы
Амфибол	-	-	-	-	-	4.7	-
Серпентин	-	-	-	-	-	следы	-
R_p , % (*)	3.7	3.5	3.1	3.5	3.6	3.0	3.2

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

Таблица 2 (продолжение). Количественный фазовый состав тяжелой фракции образцов (вес. %) по данным полнопрофильного анализа (метод Ритвельда).

	1-Т	2-Т	10-Т	11-Т	12-Т	21-Т	23-Т	24-Т
Кварц	16.1	18.4	37.4	23.4	12.0	7.9	73.7	70.7
Гематит	53.6	23.6	24.6	57.6	18.3	28.7		
Доломит	14.1	37.6	23.2	4.8	49.8	<1	<1	
К-полевой шпат	8.8	7.8	9.1	5.9	8.7	20.6	<1	<1
Анаказ	1.3	2.0	1.0	4.2	1.6	2.0	1.3	3.4
Циркон	<1	2.4	<1	1.3	<1	1.4	11.2	12.6
Апатит		4.0	1.9		2.6	7.2		
Слюда		1.9	<1		<1	4.5	4.5	1.2
Ильменит	<1					1.1		
Турмалин	<1						6.2	8.1
Магнетит						<1		2.4
Титанит	2.9							
Хлорит				2.1		18.1		
Амфибол						4.2		
Перовскит?			<1		1.6			
Гётит?						2.4		
Тефроит?				<1				
Пирротин?	<1	2.3	2.4		4.0		2	1
Пальгорскит?						1.5		
<i>R_p</i> , % (* - см. выше)	2.8	4.1	4.2	3.4	4.0	3.2	4.9	4.3

Шлиф 116 (рис. 1, в таблице РФА представлен пробой 21 и характеризует группу № 1).

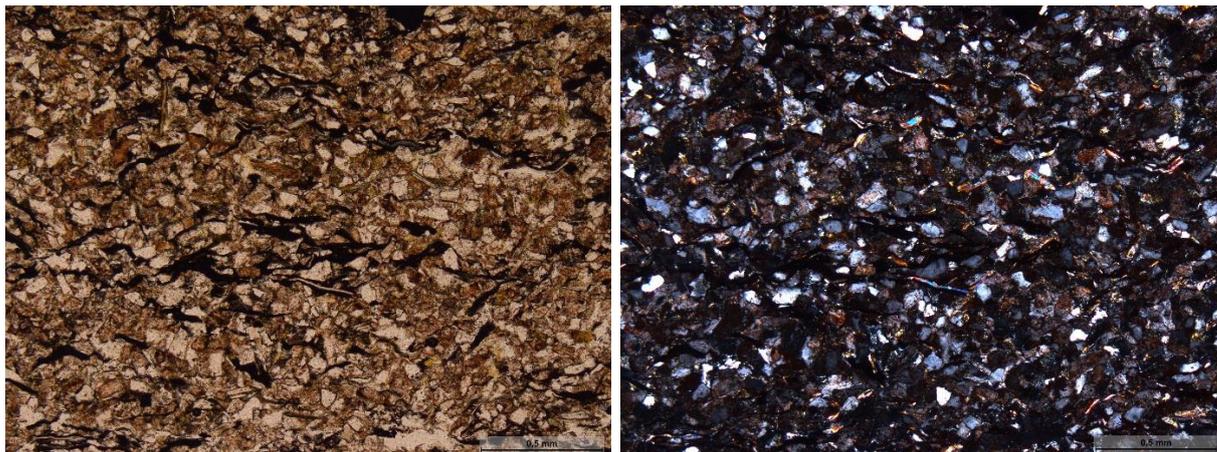


Рис. 1. Щелочнополевошпатовый алевролит (К аркозовый алевролит) (шлиф № 116). Слева - николи ||, справа - николи ×.

Данный шлиф необходимо диагностировать и изучать (описывать структурные особенности) при увеличении объектива 5х, детализировать состав и строение компонентов - при увеличении 10-20х.

Щелочнополевошпатовый алевролит (К аркозовый алевролит).

Порода состоит из обломочной части и цемента. Обломочная часть представлена калиевыми полевыми шпатами (80 %), кварцем (15 %) и кремнистыми обломочными зернами (2-3 %).

Полевые шпаты представлены калиевыми разновидностями. Минеральные виды определить затруднительно из-за сильного развития вторичных изменений вплоть до полного уничтожения зерен, хотя чистые разности принадлежат микроклину (определено по микроклиновой решетке и зубчатым двойникам) (рис. 2). Среди полевых шпатов присутствуют зерна, которые частично либо полностью замещены вторичными продуктами: хлоритом, гематитом, глинистыми минералами. Несмотря на сильное разложение, явных признаков предшествующей фельдшпатизации и привноса калия извне не обнаружено. Зерна плохо окатанные.

Кварц диагностируется с трудом. Тонкие зерна размером 0.05-0.1 мм образуют скопления в части шлифа и определяются по своей чистоте. Их немного (до 5 %). Большинство зерен алевритовой размерности, угловатые либо плохо окатанные, неправильной формы. Часть зерен может быть корродирована лимонитовым цементом.

Порода довольно слюдистая (2-3 %), с концентрированными слоями как мусковита, так и биотита. Слюды в породе хорошо определяются по их оптическим свойствам, спайности и пластинчатому облику. Они ориентированы в одном направлении и образуют директивную текстуру. Биотит зеленый, зеленовато-бурый с сильным плеохроизмом,

мусковит бесцветный. Слюды могут быть как полностью утратившими свой первоначальный облик, так и частично или же полностью неизменными, но уплотненными и деформированными между жесткими обломочными зернами. Непрозрачные участки могут представлять собой метасоматически измененные агрегаты биотита. На такое предположение указывают вкрапления гематита, которые образуются вдоль спайности слюд (рис. 3). Кроме того, ориентировка «железистой сыпи» указывает на возможное течение вещества под давлением. Большинство зерен биотита замещены хлоритом, который выделяется по желтовато-зеленой окраски в параллельных николях. Хлорит в породе также часто замещает полевые шпаты и кремнистые обломочные зерна.

Обломки кремнистого вещества, скорее всего, представляют собой микрокристаллический кварц и содержат большое количество включений. На поверхности зерен наблюдается обильная хлоритизация, гидрослюдизация и гематитизация, из-за которых зерна выглядят мутными и зеленовато-коричневыми в проходящем свете при параллельных николях. Внутри зерен проявлена пористость.

Гранулометрический анализ не был проведен, так как визуально заметно доминирование зерен алевритового размера (> 50 %). Это может указывать на застойный режим осадконакопления, вследствие чего не происходило вымывание глинистых частиц и зерен алевритовой размерности. Слабая гидродинамика способствовала широкому развитию эпигенетических изменений.

Большая часть породы бесцементная, но есть директивные трещины, напоминающие стилолиты (рис. 1, 15-20 % от всей массы шлифа), которые заполняются цементирующей железистой массой. В этом случае структурный тип цемента следующий: по количеству и распределению в породе - открытый поровый, по равномерности заполнения - островной, по степени кристалличности - аморфный, по взаимоотношению с обломочными зернами - независимой цементации. Кроме того, многие зерна КППШ характеризуются незамутненной каймой, представляющей собой регенерационный тип цемента. Данный цемент по количеству и распределению в породе является прерывистым контурным, по степени кристалличности - мозаичным, по равномерности заполнения межзернового пространства - точечным.

Поры распределены неравномерно по площади шлифа. Они могут являться вторичными, образованными вследствие процессов выщелачивания (рис. 4). Также присутствуют внутризональные поры. Края пор неровные, размер неодинаковый - присутствуют поры как много превышающие размер слагающих породу обломочных зерен, так и не превышающие.

Обилие полевых шпатов терригенного происхождения указывает на непосредственную близость коренных пород, богатыми этими минералами. Для подтверждения аномально высокого содержания полевых шпатов в данном образце в лаборатории ВСЕГЕИ был проведен химический анализ того же порошка, что и на РФА. Результаты химического анализа представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты химического анализа пробы 21 (шлиф 116).

№ лаб	Шифр заказчика	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ общ %	MnO %	MgO %
1	21	56.33	16.82	0.4351	8.193	<.01	4.01
Пределы обнаружения		0.02	0.05	0.01	0.01	0.01	0.1

Таблица 3 (продолжение). Результаты химического анализа пробы 21 (шлиф 116).

	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	ППШ %	Сумма %	V %	Cr %	Ba %
	0.4457	<.1	10.62	0.1134	3.22	100	0.0062	0.0106	0.0634
Пр. обнаруж.	0.01	0.1	0.01	0.05	0.1		0.005	0.002	0.005

Итак, 10.6 % K₂O соответствуют примерно 60-65 % чистого микроклина, так что с учетом примесей общее содержание калиевого полевого шпата около 75-80 % представляется вполне вероятным.

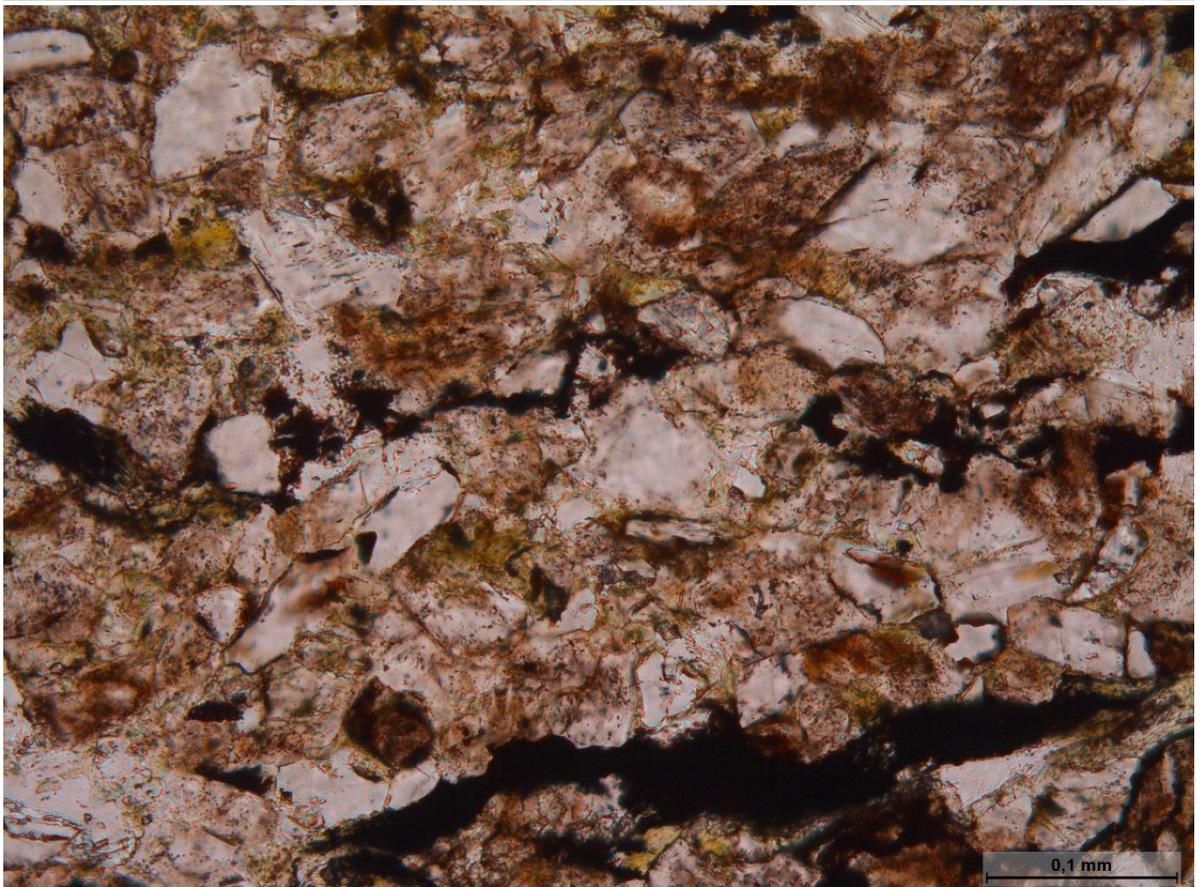
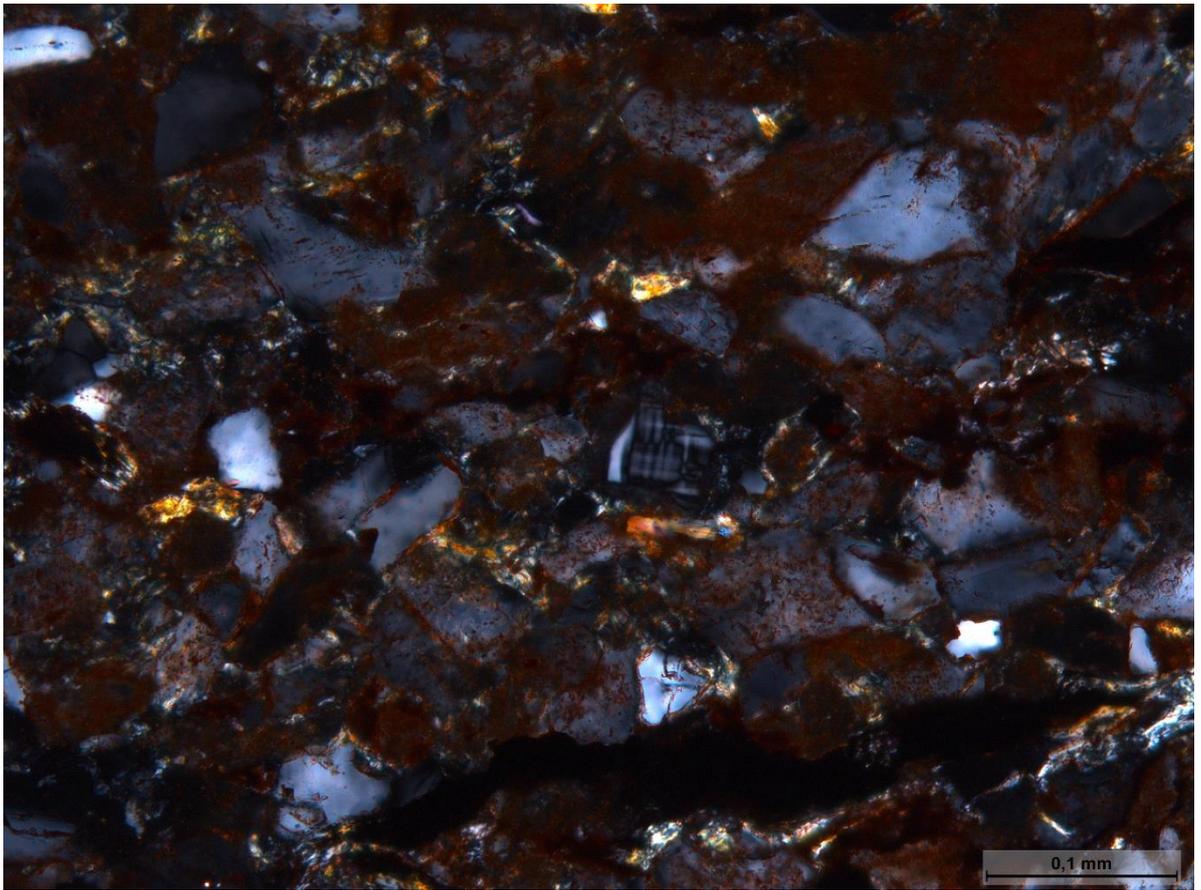


Рис. 2. Микроклиновaя решетка в невыветрелом калиевом полевоm шпате.
Сверху - николи \times , снизу - николи \parallel .

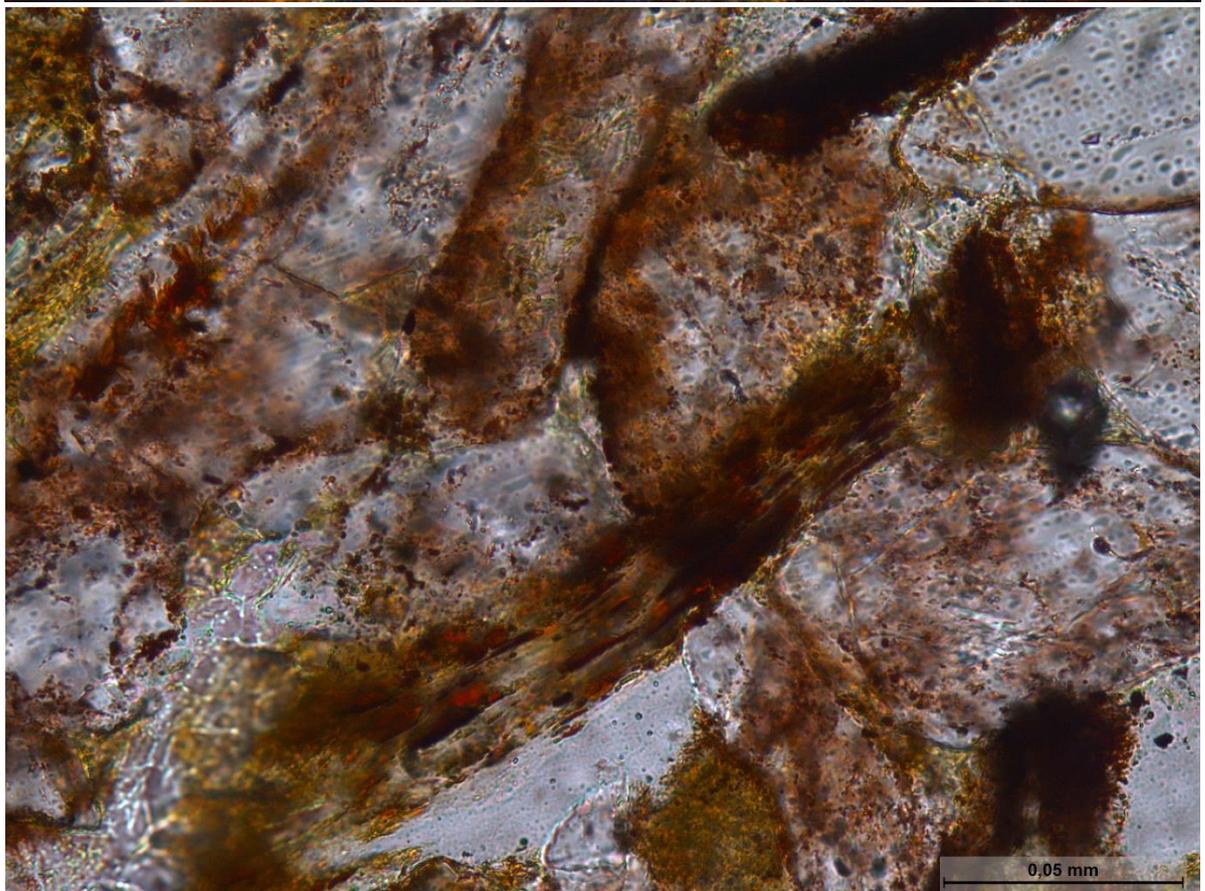
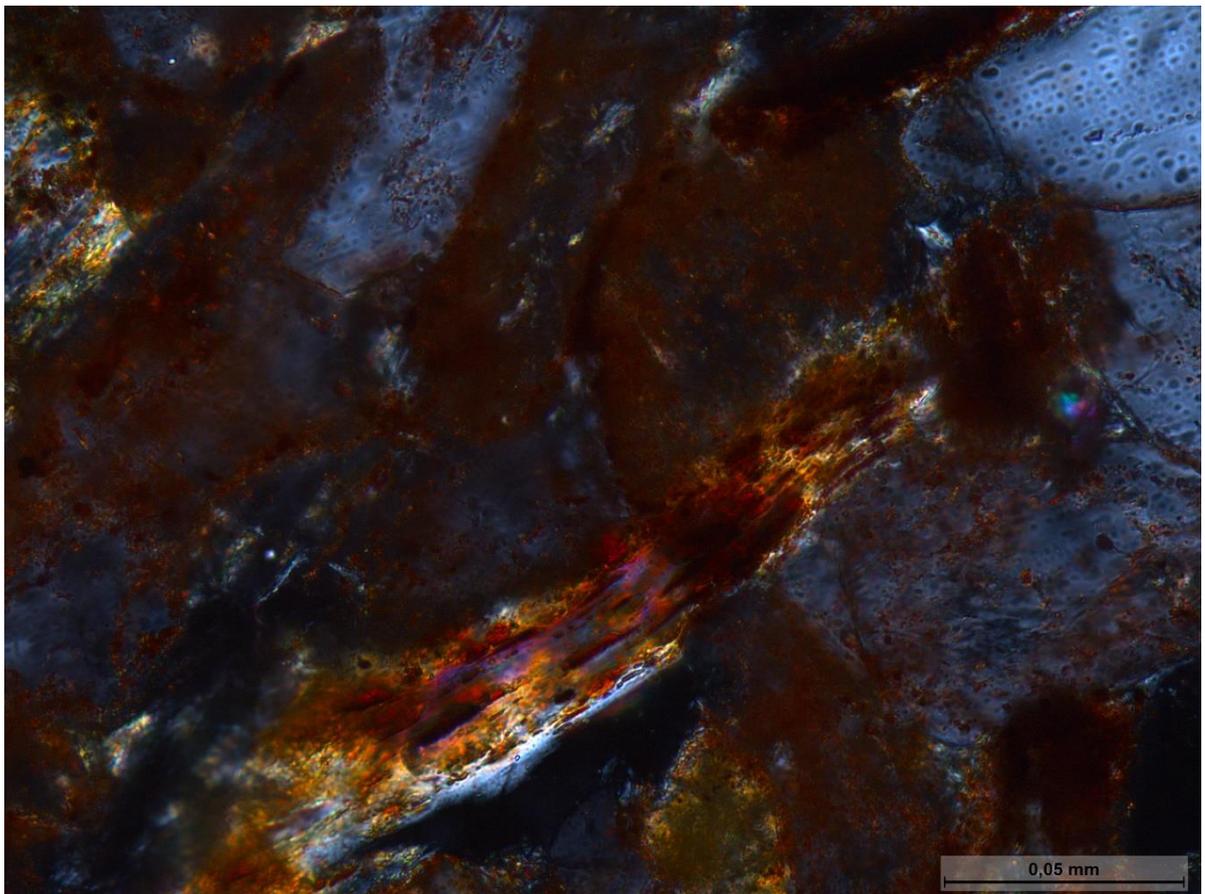


Рис. 3. Ориентировка оксидов железа по спайности слюды, указывающая на начальные метасоматические преобразования. Сверху - николи \times , снизу - николи \parallel .

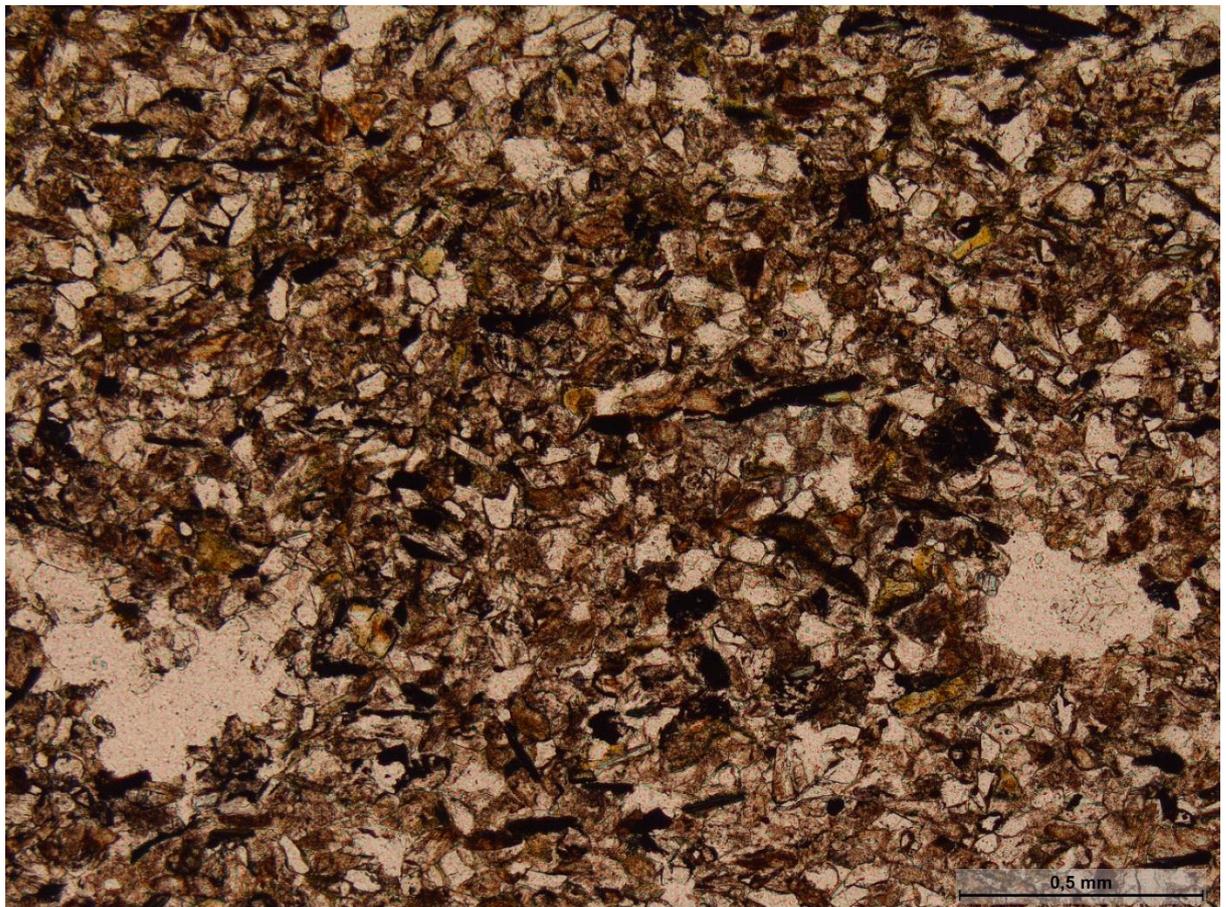
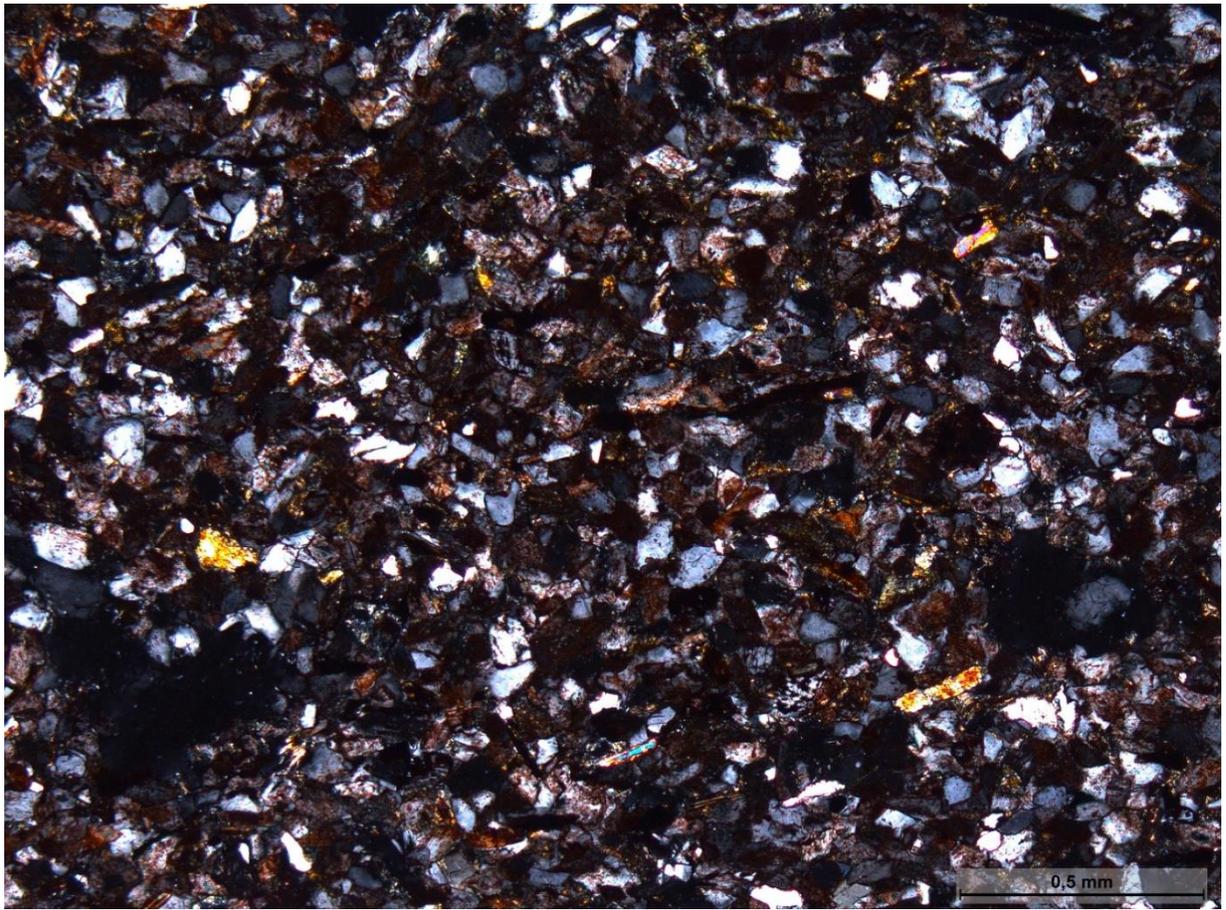


Рис. 4. Предполагаемые поры выщелачивания.
Сверху - николи \times , снизу - николи \parallel .

Существенно полевошпатовые породы фундамента были задокументированы на соседнем листе карты R-49-XXI, XXII (Сергеевская площадь) среди элювиальных измененных образований амбардахской толщи в составе верхнеанабарской серии (рис. 5) и более ранней килегирской толщи в составе далдынской серии (рис. 6). Теоретически сходные породы могут являться источниками сноса для описанного выше образца алевролита.

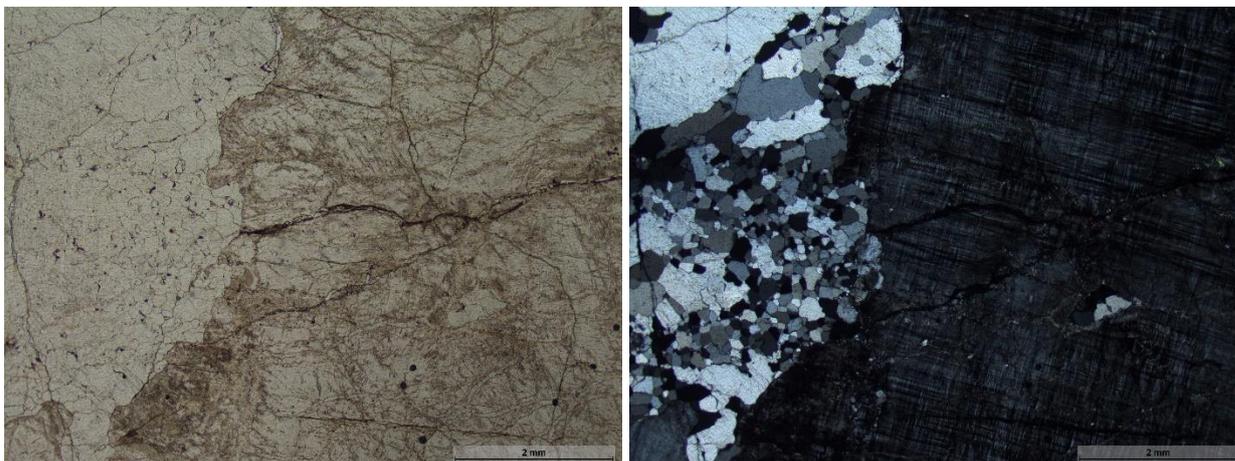


Рис. 5. Шлиф 221034/3. Крупнозернистый аляскит. Микроклин составляет около 70 % от площади всего шлифа и узнается по решетчатому строению. Кварц заполняет трещины в виде мелких зерен и заполняет пространство примерно на 30 %. Слева - николи ||, справа - николи ×.

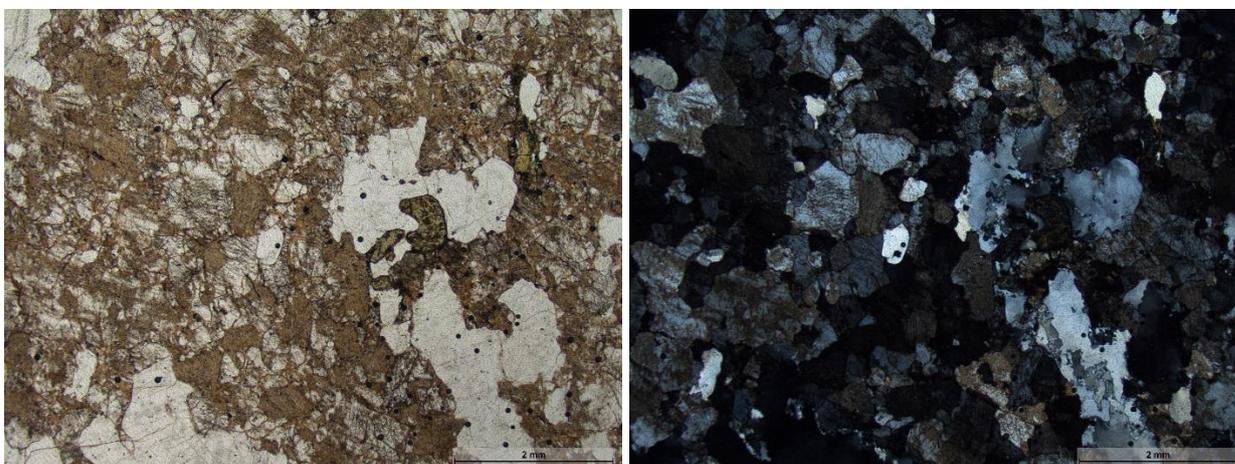


Рис. 6. Шлиф 221005. Метаморфизованный аляскит. Калиевые полевые шпаты составляют примерно 50 % от площади всего шлифа и подвергаются интенсивной пелитизации. Иногда встречаются пертиты распада. Кварц составляет около 45 % и встречается в виде необластов или субзерен. 5 % приходится на рудные минералы. Слева - николи ||, справа - николи ×.

Шлиф 59 (рис. 7, в таблице РФА представлен пробой 9 и характеризует группу № 2).

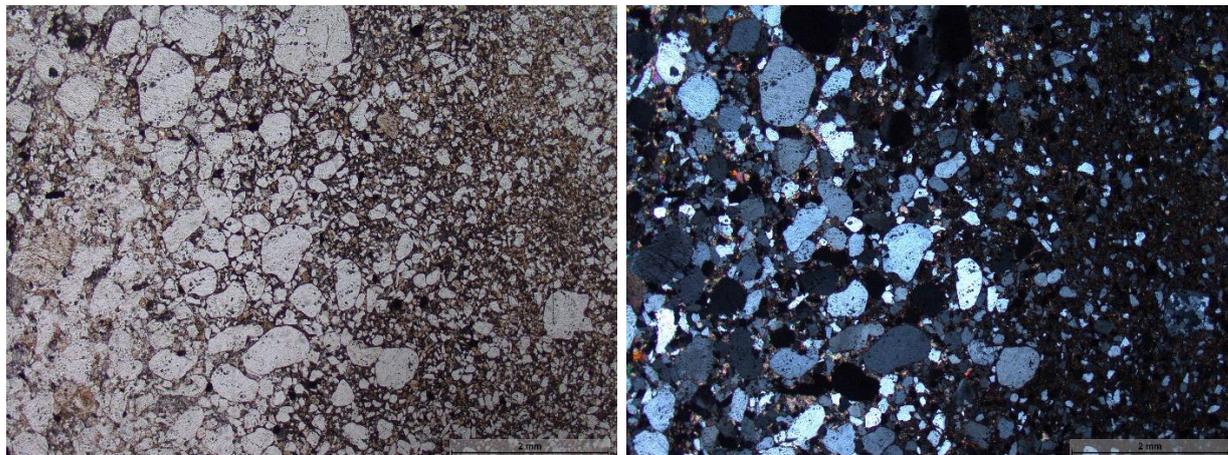


Рис. 7. Алевритовый мелко-тонкозернистый аркоз (аркозовый песчаник) с карбонатным цементом (шлиф № 59). Слева - николи ||, справа - николи \times .

Данный шлиф необходимо изучать при увеличении объектива не менее 20-25х в связи с довольно мелкими зернами, но используя при этом и увеличение 5-10х для оценки общих свойств и поиска крупных обломков пород.

Алевритовый мелко-тонкозернистый аркоз (аркозовый песчаник) с карбонатным цементом.

Порода состоит из обломочной части и цемента. Обломочная часть представлена кварцем (44 %), калиевыми полевыми шпатами (36 %), обломками карбонатных пород и кварцитов и микрокварцитов (поликристаллическим кварцем) (10-15 %), а также акцессорными включениями слюды, циркона, турмалина, магнетита (3 %). Такой состав относит породу к аркозам.

Кварц в процентном содержании преобладает на КПШ. Тонкие зерна (0.05-0.1 мм) окатаны плохо, мелкие (0.1-0.25 мм) - средне и хорошо. Часть зерен кварца характеризуется прямыми гранями, образованными в процессе регенерации, тем самым представляя собой регенерационный тип цемента.

КПШ подвержены разложению и разрушению, что выражается в развитии окислов железа и внутризерновой пористости. Некоторые зерна пелитизированы и обладают мутной поверхностью. Невыветрелые и потому определяемые полевые шпаты представлены микроклином, что подтверждается двойниковой решеткой. Отдельные зерна, так же как и кварц, характеризуются регенерационной каемкой, которая обрастает по периферии и не содержит включений гематита. Зерна в основном алевритовые, плохо окатанные. Сложно судить и о том, являются ли КПШ аутигенными в породе, так как не наблюдаются реликты

полисинтетических двойников, характерных для плагиоклазов. Плохая окатанность и отсутствие признаков метасоматического замещения наталкивают на мысль о терригенном происхождении данных зерен.

Обломки кварцитов средние по размеру, без анализатора кажутся наиболее чистыми по сравнению с другими обломками, поликристаллические. Они составляют примерно 10 % от всех обломков пород.

Карбонаты представлены доломитом, частично входящего в состав обломков, частично представленного новообразованными идиоморфными разностями. Обломки карбонатных пород средние либо грубые, имеют форму уплощенных или таблитчатых окатышей и заполнены микритом и обломочными зернами как кварца, так и полевых шпатов.

Циркон диагностируется по высокому рельефу и силе двупреломления. Некоторые зерна по форме выделения напоминают монацит. Также были обнаружены единичные зерна турмалина. Окрашенные в буровато-зеленый, светло-зеленый зерна обладают ясным плеохроизмом и относительно высоким рельефом. Магнетит непрозрачный, в отраженном свете серый.

При проведении гранулометрического анализа были получены следующие результаты: содержание зерен размером <0.05 мм - 47 %; 0.05-0.1 мм - 34 %; 0.1-0.25 мм - 16 %; 0.25-0.5 мм - 3 %, что соответствует мелко-тонкозернистой структуре. Также характерна примесь кварца и КППШ алевритового размера, рассеянного равномерно по всей площади шлифа и составляющая не более 50 %. Таким образом, порода является среднесортированной, возможно даже плохосортированной. Тонкие зерна окатаны плохо либо не окатаны вовсе, мелкие - средне и хорошо, средние - хорошо. Класс окатанности тонких зерен - 0-1, мелких и средних 2-3.

Таким образом, структура обломочной части - мелко-тонкозернистая, среднесортированная, разноокатанная.

Цемент развит участками, его соотношение с обломочной частью примерно 35/75 %. Цемент карбонатный, представлен микрокристаллическим карбонатным веществом. Структурный тип цемента: по количеству и распределению в породе - открытый поровый в одной части шлифа либо прерывистый контурный в противоположной, по равномерности заполнения пространства - пятнистый либо точечный, по степени кристалличности - микрокристаллический, по взаимоотношению с обломочными зернами - независимой цементации, однако редко встречаются участки с деструктивным типом. Для отдельных кварцевых и полевошпатовых зерен характерен регенерационный тип цемента, являющийся по количеству распределения в породе - прерывистым контурным, по степени

кристалличности - мозаичным, по равномерности заполнения порового пространства - точечным и проявляющийся в наращивании вещества того же состава, что и сами зерна.

Визуально порода мало- либо среднепористая, поры занимают не более 10 % от общей массы. По внешним признакам пористость является вторичной, образованной в результате выщелачивания и выноса карбонатного вещества из породы. Форма пор неправильная, округло-изометричная. Края пор извилистые и неровные. Размер чуть больше или равен форменным элементам.

Вероятно, одновременно с терригенными минералами происходило осаждение микритового карбонатного вещества, которое на стадии эпигенеза постепенно раскристаллизовывалось в более крупные кристаллы.

Шлиф 84 (рис. 8, в таблице РФА представлен пробой 17 и характеризует группу № 3).

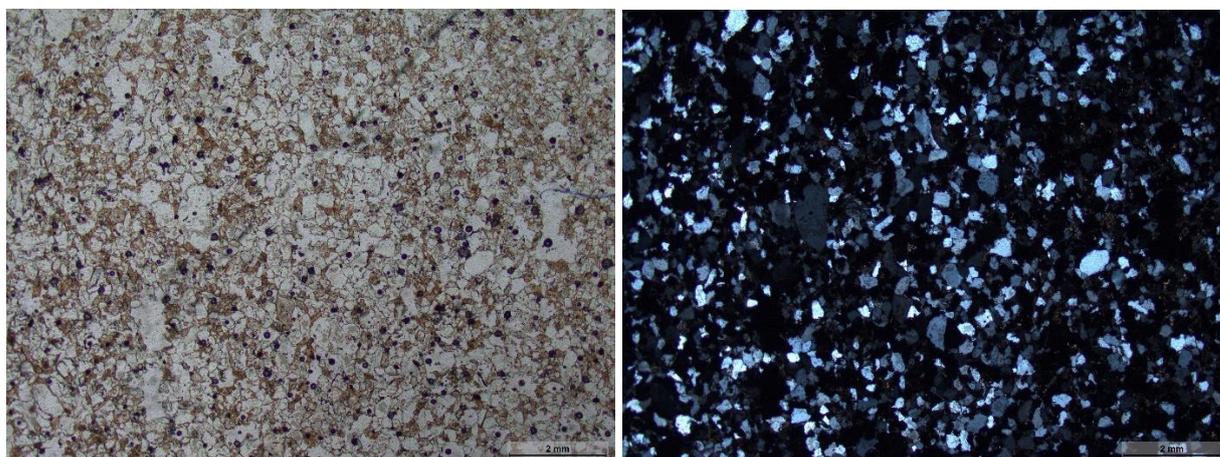


Рис. 8. Полевошпатовый алевролит (аркозовый алевролит) (шлиф № 84).

Слева - николи ||, справа - николи ×.

Данный шлиф необходимо диагностировать и изучать (описывать структурные особенности) при увеличении объектива 1,6-5х, детализировать состав, строение компонентов и цемента - при увеличении 10-20х.

Полевошпатовый алевролит (аркозовый алевролит).

Порода состоит из обломочной части и практически не имеет цемента. Обломочная часть представлена полевыми шпатами (52 %), кварцем (46 %) и немногочисленными обломками пород (1 %).

Кварц диагностируется по характерным для него оптическим свойствам. Кварцевые зерна чистые, ближе к краю шлифа сильно трещиноватые. Минимальный и преобладающий размер зерна <0.05 мм, максимальный - 0.25 мм, средний - примерно 0.1 мм. Зерна угловатые и плохо окатанные.

Полевые шпаты имеют такой же разброс размеров, как и кварц. Зерна полевых шпатов угловатые, таблитчатые, призматические или неправильной формы. Все они характеризуются железистой пленкой на своей поверхности, образованной в результате процессов выветривания и окисления. Степень вторичного изменения зерен высока. Большинство полевых шпатов не имеют центральной части, что может объясняться внутризерновой пористостью.

Зерна обломков пород присутствуют в очень малых количествах (1 %). По размеру зерна тонкие (0.05-0.25 мм), окатаны средне, представлены обломками микрокварцитов и, возможно, обломками карбонатных пород, диагностируемых по округлым очертаниям и микритуловому наполнению.

Из аксессуаров изредка попадаются обломки высоких цветов интерференции и с сильным рельефом.

При проведении гранулометрического анализа были получены следующие результаты: содержание зерен размером <0.05 мм - 65 %; 0.05-0.1 мм - 30 %; 0.1-0.25 мм - 5 %, что соответствует алевритовой структуре. Таким образом, порода является среднесортированной. Зерна окатаны плохо, класс окатанности большинства зерен - 0-1.

Цемент в породе практически отсутствует, представлен карбонатным веществом. Он развит участками и только на одной половине шлифа. Структурный тип цемента следующий: по количеству и распределению в породе - прерывистый контурный, по равномерности заполнения - преимущественно точечный (так как промежуточное пространство между зернами заполнено, скорее всего, обломками карбонатных пород либо метасоматическими кристаллами), по степени кристалличности - микрокристаллический, по взаимоотношению с обломочными зернами - деструктивный: проникновения. Также иногда можно встретить наращивание кварца и полевых шпатов регенерационным цементом того же состава с той же оптической ориентацией, что и сами зерна. Данный цемент по количеству и распределению в породе является прерывистым контурным, по степени кристалличности - мозаичным, по равномерности заполнения межзернового пространства - точечным.

Визуально порода довольно пористая (содержание пор приближается примерно к 20 %). Характерно наличие нескольких видов пористости: внутри- и межзерновой, а также пор среднего размера, образованных, возможно, при выщелачивании. Поры и трещины часто неправильной формы, с изрезанными краями. Размер пор неодинаковый - присутствуют поры как много превышающие размер слагающих породу обломочных зерен, так и не превышающие, занимающие область межзернового пространства. Средние поры распределены слоями, тонкие - неравномерно по всему шлифу.

Обилие полевых шпатов терригенного происхождения указывает на близость коренных пород, богатыми этими минералами, их широко проявленная измененность - на гумидный климат, а размер, возможно, - на слабую гидродинамику внутри бассейна седиментации.

Шлиф 87 (рис. пр-9, в таблице РФА представлен пробой 18 и характеризует группу № 4).

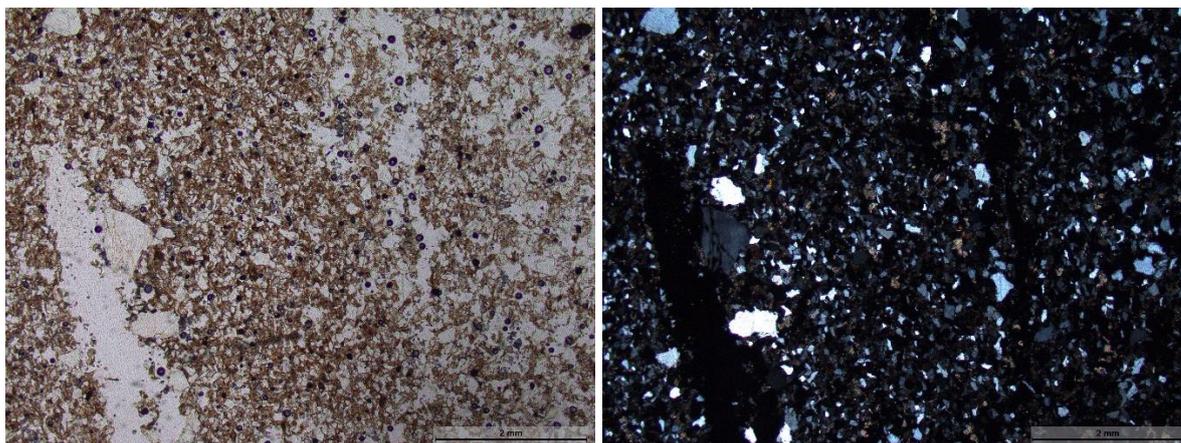


Рис. пр-9. Полевошпатовый алевролит (аркозовый алевролит) (шлиф № 87).

Слева - николи ||, справа - николи ×.

Данный шлиф необходимо изучать при увеличении объектива не менее 10-20х в связи с довольно мелкими зернами, детализировать состав и строение компонентов - при увеличении 40х.

Полевошпатовый алевролит (аркозовый алевролит).

Порода состоит из обломочной части и практически не имеет цемента. Обломочная часть представлена кварцем, калиевым полевым шпатом и немногочисленными обломками пород, образованными поликристаллическим кварцем.

Кварц составляет 58 % и диагностируется по характерным для него оптическим свойствам. КПШ образуют 41 % шлифа. Как и в остальных образцах диагностическим свойством полевых шпатов в данном случае является их буроватая окраска, связанная с окислами железа, которые образуются при разложении самих КПШ. Обломочные зерна как кварца, так и калиевого полевого шпата алевритовой размерности (<0.05 мм), но встречаются и тонкие (5-10 %). Зерна часто угловатые и плохо окатанные. Класс окатанности 1-2. Вокруг выборочных зерен кварца и полевых шпатов наблюдаются регенерационные каемки. Данный цемент по количеству и распределению в породе является прерывистым контурным, по степени кристалличности - мозаичным, по равномерности заполнения межзернового пространства - точечным.

Обломки микрокварцитов чистые, но их находки единичны и составляют около процента от всего шлифа. В качестве акцессорных минералов можно обнаружить обломки с высоким рельефом и силой двупреломления. Предположительно, это могут быть кусочки циркона. Встречается биотит, хлорит и единичные зерна магнетита.

Цемент представлен карбонатным веществом на краю шлифа, а также отдельными пятнами вдоль пор. Цемент образует около 10 % от всей массы шлифа. Хотя его можно принять за обломок карбонатной породы, круглых очертаний не видно. В таком случае структурный тип цемента следующий: по количеству и распределению в породе - открытый поровый в одной части шлифа либо прерывистый контурный в остальном пространстве, по равномерности заполнения - островной либо точечный, по степени кристалличности - микро-, мелкокристаллический, по взаимоотношению с обломочными зернами - независимой цементации, участками развит и деструктивный.

Порода характеризуется широко проявленным пустотным пространством, судя по всему, представленным кавернами (>1 мм). Размер пустот кратно больше размера обломочных зерен. Форма удлинённая, неправильная, щелевидная. Края извилистые, неровные. Пустоты распределены неравномерно по всему шлифу.

Содержание кварца и полевых шпатов в породе примерно одинаковое, что может говорить о близости высокополевошпатовых материнских пород, которые поставляли исходный материал для формирования алевrolита. При этом алевrolитовый размер слагающих зерен может говорить о слабой гидродинамике в бассейне седиментации.

Шлиф 50 (рис. 10, в таблице РФА представлен пробой 6 и характеризует группу № 5).

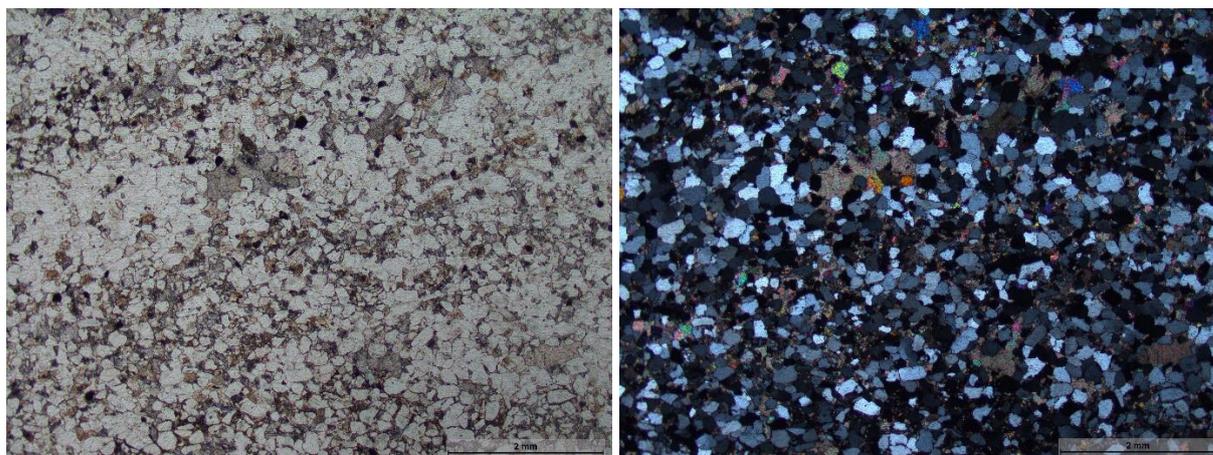


Рис. 10. Алевrolитовый олигомиктовый тонкозернистый песчаник с карбонатным (10-15 %) цементом (шлиф № 50). Слева - николи ||, справа - николи ×.

Данный шлиф необходимо диагностировать и изучать (описывать структурные особенности) при увеличении объектива 1,6-5х, детализировать состав, строение компонентов и цемента - при увеличении 10-20х.

Алевритовый олигомиктовый тонкозернистый песчаник с карбонатным (10-15 %) цементом.

Порода состоит из обломочной части и цемента. Обломочная часть представлена кварцем (74 %), полевыми шпатами (20 %) и немногочисленными обломками пород (1-2 %). Заметно развитие рудных минералов (до 5 %). Выделяется своим присутствием и единичное зерно турмалина. Встречается циркон (иногда зональный) и, предположительно, монацит. Визуально порода малопористая. Присутствуют дырки, которые могут быть образованы на месте выпавших зерен и потому не являющиеся порами. Также в некоторых местах наблюдаются трещины, заполненные затертыми зернами кварца, вторичными кристаллами карбонатов и изогнутыми пластинками биотита (рис. 11).

Кварцевые зерна преобладают над полевошпатовыми. Кварц чистый, но в некоторых участках шлифа окаймляется гидрослюдами. Средний размер зерен - 0.05-0.1 мм, но многие из них имеют и меньший размер. Зерна в основном окатаны средне, но встречаются также и плохо окатанные. Иногда заметно появление регенерационных кайм прямой, идиомерной формы.

Полевых шпатов в породе не много. Большинство из них окисленные, с буроватым налетом на поверхности. На поверхности некоторых зерен развивается вторичный доломит и внутризерновая пористость.

Обломки пород редки. Они представлены микрокварцитами, которые узнаются по чистоте зерен и поликристалличности. Средний размер обломков алевритовый. Окатанность средняя-хорошая.

Широко проявлены метасоматические карбонатные зерна, которые выделяются идиоморфной формой и ровными гранями. На фоне общей массы заметно единственное зерно турмалина. Оно характеризуется признаками, свойственными V группе Лодочникова, имеет низкие цвета интерференции, плеохроизм зеленых тонов и округлую форму выделения.

При проведении гранулометрического анализа были получены следующие результаты: содержание зерен размером <0.05 мм - 40 %; 0.05-0.1 мм - 60 %, что соответствует тонкозернистой структуре. Зерна окатаны плохо и средне, класс окатанности большинства зерен - 1-2. В качестве примесей в песчанике содержатся зерна алевритовой размерности в количестве 40 %.

Цемент представлен карбонатным веществом. Кроме того, отдельными участками встречаются области развития лимонитового цемента. Лимонитовый цемент представлен непрозрачным коричнево-бурым либо темно-зеленоватым аморфным веществом.

Структурный тип цемента, представленного карбонатом: по количеству и распределению в породе - закрытый поровый, по равномерности заполнения - преобладающий несплошной, по степени кристалличности - микро-, мелкокристаллический, по взаимоотношению с обломочными зернами - деструктивный; структурный тип лимонитового цемента: по количеству и распределению в породе - прерывистый контурный, по равномерности заполнения - точечный, по степени кристалличности - аморфный, по взаимоотношению с обломочными зернами - пленочный. Для немногочисленного регенерационного кварцевого цемента характеристики следующие: по количеству и распределению в породе - прерывистый контурный, по степени кристалличности - мозаичный, по равномерности заполнения межзернового пространства - точечный.

Данная порода является довольно зрелой, что указывает на появление новых источников сноса вследствие относительно длительного перемыва обломочных компонентов по сравнению с вышеописанными пробами. Однако средняя окатанность зерен исключает возможность слишком далекого переноса.

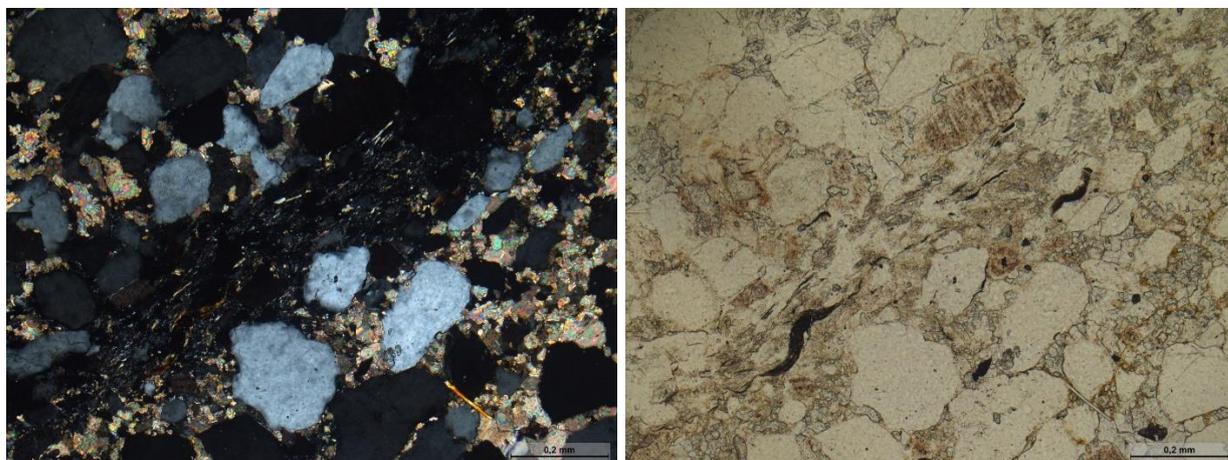


Рис. 11. Участок с затертыми зернами микрокристаллической размерности. Сверху - николи \times , снизу - николи \parallel .

Шлиф 139 (рис. 12, в таблице РФА представлен пробой 24 и характеризует группу № 6).

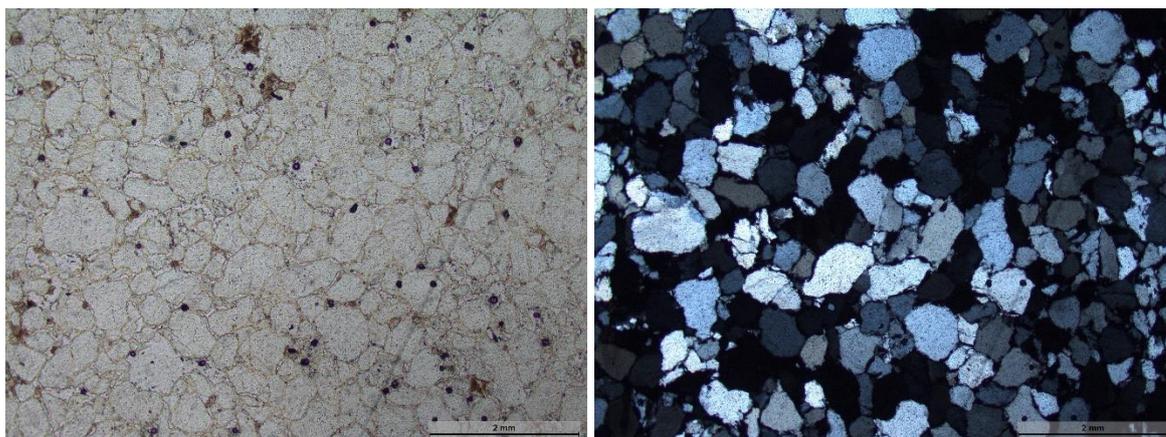


Рис. 12. Мелко-тонкозернистый кварцевый песчаник (шлиф № 139).

Слева - николи ||, справа - николи x.

Данный шлиф необходимо изучать при увеличении объектива 1,6х, поскольку песчаник состоит из довольно крупных зерен; детализировать состав и строение компонентов - при увеличении объектива 5х.

Мелко-тонкозернистый кварцевый песчаник.

Для породы не характерно проявление цемента, однако некоторые зерна могут иметь регенерационную кайму, которую можно описать как катагенетический регенерационный цемент. В этом случае цемент по количеству и распределению в породе является прерывистым контурным, по степени кристалличности - мозаичным, по равномерности заполнения межзернового пространства - точечным. Обломочная часть представлена кварцем (90 %), калиевыми полевыми шпатами (4 %) и обломками кварцитов (6 %).

Кварц диагностируется по характерным для него оптическим свойствам: чистота зерен, серые цвета интерференции, IV группа Лодочникова. Минимальный размер обломков меньше 0.05 мм, максимальный - 0.25 мм. Подавляющее большинство зерен средне окатанные, имеют 2 класс окатанности. Многие из обломков имеют овальную форму, но также встречаются и сферичной. Содержание кварца от всей обломочной части составляет 90 %.

Зерна полевых шпатов выветрелые, покрытые бурым налетом и несущие следы вторичных преобразований. Полевые шпаты состоят из «ядра» и наращенной «оболочки» - каймы, при этом выветрелое и то, и другое. «Ядро» содержит двойники, напоминающие тартановые (Ulmer-Scholle et al., 2014). Хотя такое двойникование характерно для большинства щелочных полевых шпатов, чаще всего оно проявляется микроклином и представляет собой комбинацию двойников альбита и периклина. Примечательно, что «оболочка» вокруг «ядра» не содержит двойников и является постседиментационной,

представляя собой регенерационный тип цемента. Размер полевых шпатов тот же, что и у кварца, окатанность меньше. Содержание полевых шпатов от всей обломочной части составляет не более 5 %.

Зерна обломков присутствуют в небольших количествах (около 5 %), они средне окатаны и имеют сходные с остальными размеры, колеблющиеся в диапазоне 0.05-0.25 мм. Обломки представлены исключительно кварцитами и микрокварцитами, претерпевшими слабый метаморфизм.

При проведении гранулометрического анализа были получены следующие результаты: содержание зерен размером <0.05 мм - 15 %; 0.05-0.1 мм - 41 %; 0.1-0.25 мм - 44 %, что соответствует мелко-тонкозернистой структуре с алевритистой составляющей. Таким образом, порода является среднесортированной. Зерна окатаны средне, класс окатанности большинства зерен - 2. В качестве примесей в песчанике содержатся зерна алевритовой размерности в количестве 15 %, представленные неокатанными обломочными зернами кварца.

Поры визуально занимают существенную площадь в породе (5-10 %). По внешним признакам пористость является межзерновой. Следов выщелачивания не видно. Размер пор меньше форменных элементов, края неровные, изрезанные.

Данный образец явно был сформирован в платформенных условиях, о чем свидетельствует его высокая зрелость. Буроватый налет на всех полевых шпатах может говорить о гумидном климате, существовавшем во время образования породы.