



LYSAN ALKALINE-ULTRABASIC COMPLEX (EASTERN SAYAN): AGE AND GEODYNAMIC CONSEQUENCES

A.S. Mekhonoshin ¹✉, T.B. Kolotilina ¹, A.V. Travin ²

¹ Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1a Favorsky St, Irkutsk 664033, Russia

² Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

ABSTRACT. This paper presents new ideas about the formational identity, as well as the first data on the age of formation of rocks within the Lysan intrusive complex located at junction of the Derbin block and the Sisim-Kazyr zone of the Central Asian folded belt. The study identified the similarities between the Lysan complex and intrusions of the alkaline-ultrabasic formation. It formed during the period of maximum intraplate activity along the edge of the Siberian craton.

KEYWORDS: Alkaline-ultrabasic complex; ore olivinites; alkaline syenites; Ar-Ar dating; Rodinia decay; Eastern Sayan

FUNDING: The studies are performed as a part of the governmental assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation to research theme 0284-2021-0006 "Ultrabasic – basic complexes of the Siberian craton and its folded frame: evolution of composition, geodynamic aspects of formation and ore potential".

RESEARCH ARTICLE

Received: June 6, 2022

Revised: July 7, 2022

Accepted: July 20, 2022

Correspondence: Aleksey S. Mekhonoshin, mekhonos@igc.irk.ru

FOR CITATION: Mekhonoshin A.S., Kolotilina T.B., Travin A.V., 2022. Lysan Alkaline-Ultrabasic Complex (Eastern Sayan): Age and Geodynamic Consequences. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (4), 0651. doi:10.5800/GT-2022-13-4-0651

ЛЫСАНСКИЙ ЩЕЛОЧНО-УЛЬТРАОСНОВНОЙ КОМПЛЕКС (ВОСТОЧНЫЙ САЯН): ВОЗРАСТ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

А.С. Мехоношин¹, Т.Б. Колотилина¹, А.В. Травин²

¹ Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

² Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

АННОТАЦИЯ. Представлены новые сведения о формационной принадлежности и первые сведения о возрасте образования пород Лысанского интрузивного комплекса, расположенного в зоне сочленения Дербинского блока и Сисимо-Казырской зоны Центрально-Азиатского складчатого пояса. Показано, что Лысанский комплекс обладает сходством с интрузиями щелочно-ультраосновной формации и его формирование происходило в период максимальной внутриплитной активности вдоль края Сибирского кратона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: щелочно-ультраосновной комплекс; рудные оливиниты; щелочные сиениты; Ar-Ar датирование; распад Родинии; Восточный Саян

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования выполнены в рамках государственного задания Минобрнауки РФ в части проведения НИР по теме № 0284-2021-0006 «Ультраосновные – основные комплексы Сибирского кратона и его складчатого обрамления: эволюция состава, геодинамические аспекты образования и рудный потенциал».

1. ВВЕДЕНИЕ

Определение взаимного размещения и границ между отдельными кратонами в пределах суперконтинентов на протяжении многих десятилетий остается одной из актуальных проблем палеогеодинамики. С одной стороны, реконструкции границ опираются на сочетания палеомагнитных и геологических данных, с другой – используется положение и данные о возрасте индикаторных магматических комплексов на границах кратонов.

В последние десятилетия в результате проведения комплексных исследований ведущими международными научными коллективами [Li et al., 2008; Bogdanova et al., 2009; Ernst et al., 2016; Cawood et al., 2016; и др.] удалось получить убедительные свидетельства существования неопротерозойского суперконтинента Родиния, установить временные этапы, механизмы и последовательность событий, приведших к его образованию и распаду. Время распада суперконтинента, в свою очередь, служит отправной точкой для оценки времени заложения Палеоазиатского океана, в результате развития которого произошло формирование Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП). Одними из признанных индикаторов раскола суперконтинентов считаются поясовые рифтогенные проявления внутриплитного магматизма на границах кратонов, фиксирующие зоны транслитосферных расколов [Yarmolyuk, Kovalenko, 2001; Yarmolyuk et al., 2005].

В западной части Восточного Саяна в зоне сопряжения структур Сибирского кратона и ЦАСП широко распространены интрузии основного – ультраосновного состава, с которыми тесно ассоциируют дайки щелочных сиенитов. Ранее их относили к габбро-пироксенитовой [Glazunov, 1975] или перидотит-пироксенит-габбровой формации [Bognibov et al., 2000] рифтогенных структур ЦАСП.

В настоящей статье предлагается новый взгляд на формационную принадлежность и геодинамическую обстановку формирования этих интрузий, приводятся данные о возрасте, свидетельствующие об их образовании в неопротерозое.

2. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ИНТРУЗИЙ ЛЫСАНСКОГО КОМПЛЕКСА

На западе Восточного Саяна, в зоне сочленения Дербинского блока Саяно-Енисейского аккреционного пояса (по [Nozhkin et al., 2018]) и Сисимо-Казырской зоны ЦАСП (рис. 1, а), располагается Лысанский интрузивный комплекс. Он протягивается более чем на 150 км от истоков р. Дербина до верхнего течения р. Шинда. В районе р. Сисим он разделяется на две ветви: Лысанскую, вытянутую вдоль осевой линии Манского Белогорья через голец Лысан и Кедранский хребет, и параллельно идущую Колпинскую ветвь.

Массивы комплекса имеют форму вытянутых в северо-западном направлении линзо- или пластообразных тел протяженностью до 5 км и мощностью до 300 м. Интрузии сложены рудными оливинитами, пироксенитами и габбро, которые рассечены дайками и жилами щелочных сиенитов. На контактах с вмещающими породами развиты зоны милонитизации и катаклаза. Вмещающими породами для них являются отложения кувайской серии, за пределами которой они не встречаются. Кувайская серия с угловым несогласием, а иногда с постепенным переходом залегает на нижнепротерозойских образованиях карбонатно-терригенной дербинской серии. Она делится на три толщи: урманскую – терригенно-вулканогенного состава, манскую – карбонатно-сланцевую и бахтинскую – вулканогенно-осадочную. Интрузии Лысанского комплекса преимущественно распространены в пределах верхней части серии в бахтинской толще, отложения которой

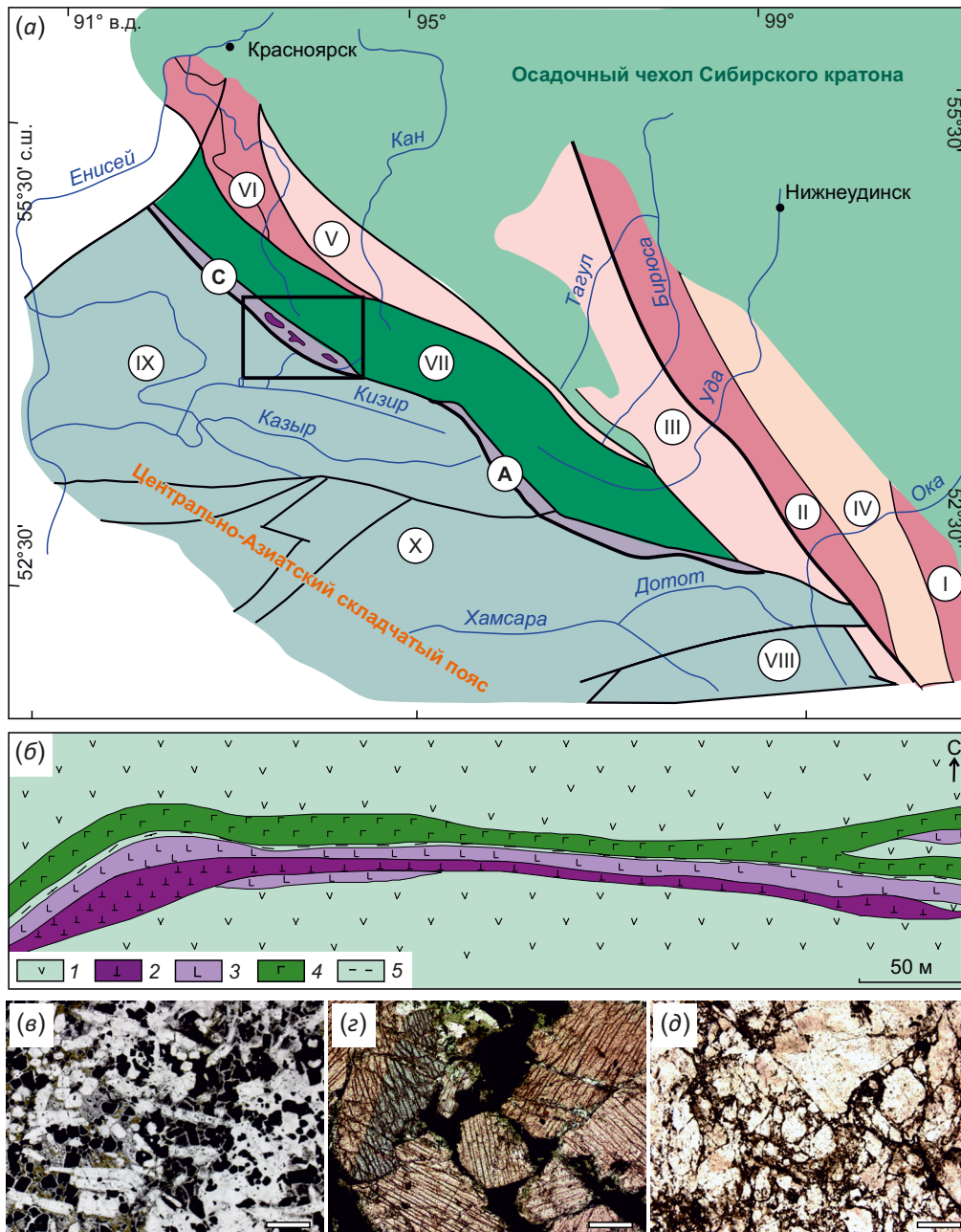


Рис. 1. Положение интрузий Лысанского комплекса (черный прямоугольник) в структурах юга Сибири (а), геологическая карта Кедранского массива (б) и основные разновидности пород (в-д).

(а): римскими цифрами обозначены (по [Nozhkin et al., 2018; Mekhonoshin et al., 2012]): I–II выступы Сибирского кратона: I – Шарышалгайский, II – Бирюсинский; III – Алхадырский блок; IV – Урикско-Ийский грабен; V–VII структуры Саяно-Енисейского аккреционного пояса: V – Канский блок, VI – Шумихинско-Кирельский и Арзыбейский блоки, VII – Дербинский блок; VIII–X – структуры Центрально-Азиатского складчатого пояса: VIII – Хойто-Окинский террейн, IX – Хамсаринский террейн, X – Сисимо-Казырский террейн. Буквами обозначены (по [Altukhov, 1986]): А – Ашкасохский прогиб, С – Сисимский прогиб. (б): 1 – амфиболиты бахтинской толщи; 2 – рудные оливиниты; 3 – клинопироксениты; 4 – габброиды; 5 – актинолититы. (в–д): микрофотографии пород, поляризаторы параллельны. Объектив 2×, масштабный отрезок соответствует 1 мм: (в) – рудный оливинит, (з) – клинопироксенит, (д) – щелочной сиенит.

Fig. 1. Position of the intrusions of the Lysan complex (black rectangle) in the structures of southern Siberia (а), geological map of the Kedran massif (б) and main varieties of rocks (в–д).

(а): Roman numerals indicate (according to [Nozhkin et al., 2018; Mekhonoshin et al., 2012]): I–II projections of the Siberian craton: I – Sharyzhalgai, II – Biryusinsky; III – Alkhadyr block; IV – Urik-Iy graben; V–VII structures of the Sayan-Yenisei accretion belt: V – Kansky block, VI – Shumikhinsky-Kirel and Arzybeysky blocks, VII – Derbinsky block; VIII–XI structures of the Central Asian folded belt: VIII – Khoito-Okinsky terrane, IX – Khamsara terrane, X – Sisimo-Kazyr terrane. Letters denote (according to [Altukhov, 1986]): A – Ashkasokh trough, C – Sisim trough. (б): 1 – amphibolites of the Bakhtin strata; 2 – ore olivinites; 3 – clinopyroxenites; 4 – gabbroids; 5 – actinolithites. (в–д): photomicrographs of rocks, plane-polarized light. 2× lens, scale line – 1 mm: (в) – ore olivinite, (z) – clinopyroxenite, (d) – alkaline syenite.

образуют полосу шириной 4–5 км, смятую в изоклинальные складки северо-западного простирания. Она сложена эффузивными породами, преобразованными в условиях от зеленосланцевой до эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма, переслаивающимися с линзами известняков и микрокварцитов. В метаэффузивах часто наблюдается шаровая отдельность, свидетельствующая об их подводном излиянии. Кроме того, в них выделяются прослои хлорит-серицитовых и углистых сланцев, амфиболиты с линзами известняков и карбонатно-хлоритовых сланцев, плагиогнейсов, прослоев кварцитов и битуминозных известняков.

Самый крупный массив, Подлысанский, расположен на водоразделе р. Балахтисон, притока р. Шинда и руч. Подлысанского – правого притока р. Сисим. Он представляет собой три кулисообразно расположенных линзы апооливинитовых серпентинитов и пироксенитов, рассеянных телами габброидов и щелочных сиенитов. Наблюдается выклинивание тел оливинитов и пироксенитов на глубину и увеличение мощности габброидов. Контакты между телами пород, так же как и с вмещающими, – тектонические. Оливиниты северной части массива прорываются многочисленными жилами щелочных сиенитов. В южной части массива, на участке Пирамида, крупная дайка щелочных сиенитов, мощностью около 10 м, рассекает как перидотиты, так и пироксениты с габброидами.

Кедранский массив расположен в пределах одноименного хребта на водоразделе рек Балахтисон – Малая Шинда. Он состоит из нескольких параллельных выдержанных по мощности пластообразных тел северо-западного простирания. Самое крупное тело (рис. 1, б) состоит из габброидов, рудных пироксенитов и рудных серпентинизированных оливинитов. В перидотитах Кедранского массива отмечаются самые богатые титаномагнетит-ильменитовые руды.

3. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В исследовании использованы образцы пород, отобранные в коренных обнажениях массивов Лысанского интрузивного комплекса. Анализ пород и минералов был выполнен в ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН [Skuzovatov et al., 2022]. Концентрации микроэлементов в пробах получены методом масс-спектрометрии с ионизацией в индуктивно связанной плазме (ICP-MS). Измерения проводились на масс-спектрометрах с магнитным сектором ELEMENT 2 (Finnigan MAT, ФРГ) с двойной фокусировкой и регистрацией сигнала в трех разрешениях: низком (LR)-300, среднем (MR)-4000 и высоком (HR)-10000 М/ΔМ. Правильность определения концентраций микроэлементов и дрейф прибора контролировались по международным стандартным образцам базальтов BHVO-1, BHVO-2 (USGS) и перидотита JP-1 (GSJ). Состав минералов определялся *in situ* в полированных пластинках методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной спектрометрии (СЭМ ЭДС) и рентгеноспектрального

электронно-зондового микроанализа (РСМА). СЭМ ЭДС анализ выполнялся на электронном микроскопе Tescan MIRA 3 LMN (Tescan, Чешская Республика) с системой энергодисперсионного анализа AztecLive Advanced Ultim Max 40 (Oxford Instruments Analytical Ltd., Великобритания). Анализы выполняли при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда ~0.5 нА, время накопления спектра составляло 10–50 с. РСМА выполнялся на микроанализаторе Superprobe JXA8200 (JEOL Ltd., Япония) при следующих условиях: размер электронного пучка – 1 мкм, ток зонда – 20 нА, ускоряющее напряжение – 20 кВ, время счета – 10 с вдоль линии пика плюс 5 с для фона по обе стороны от линии пика. Метрологические характеристики методик были определены на контрольных образцах известного состава. Ag-Ag датирование амфибола выполнено в Аналитическом центре ИГМ СО РАН на масс-спектрометре Micro-mass Noble gas 5400 методом ступенчатого прогрева [Travin et al., 2009]. Во всех полученных спектрах наблюдалось четкое плато, среднее взвешенное по которому и принято за возраст закрытия К/Аг изотопной системы.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Петрография. Ультраосновные породы в составе Лысанского комплекса представлены рудными оливинитами. Породы мелкозернистые с директивными текстурами, директивность выражена ориентированным расположением вытянутых кристаллов оливина или псевдоморфоз серпентина. Микроструктура оливинитов изменяется от панидиоморфной до сидеронитовой (рис. 1, в). В небольших количествах присутствуют ксеноморфные кристаллы клинопироксена, которые замещаются роговой обманкой. Руды представляют собой тесные сростания титаномагнетитов и ильменитов. В титаномагнетитах наблюдаются структуры распада в виде тонких ламелей ильменита.

Вторыми по распространенности породами являются клинопироксениты – среднезернистые породы, состоящие из титанавгита, феррокерсутита и ильменита (рис. 1, г). Количество феррокерсутита в пироксенитах меняется от первых до 50 об. %, взаимоотношения между пироксеном и феррокерсутитом свидетельствуют об образовании амфибола на последних стадиях магматического процесса. В породах отсутствует титаномагнетит, при этом рудные минералы представлены ильменитом.

Габброиды состоят из плагиоклаза, титанавгита, керсутита и ильменита. Первичные плагиоклазы и клинопироксены сохранились только в реликтах. Для них характерны полосчатые текстуры, гипидиоморфнозернистые и пойкилитовые структуры.

Щелочные сиениты представляют собой лейкократовые породы, в которых из первичных минералов сохранился только плагиоклаз (рис. 1, д), темноцветные минералы замещены биотит-карбонатными агрегатами. Внутри отдельных зерен плагиоклаза наблюдаются мелкие червеобразные вроски нефелина. Акцессорные

минералы представлены цирконом и апатитом. Породы рассечены тонкими карбонатитовыми прожилками, в которых сиениты присутствуют в виде обломков. Карбонатиты состоят из кальцита, сидерита, бастнезита, фторапатита, монацита и циркона.

Минералогия. Нами впервые изучен состав оливинов рудных оливинитов, который характеризуется 18–20%-ным содержанием фаялитового компонента, очень низкими концентрациями NiO (<0.15), MnO (0.20–0.30 мас. %), постоянной примесью CaO (0.15–0.46 мас. %) (Прил. 1, табл. 1.1). Состав клинопироксенов в оливинитах, клинопироксенитах и габброидах близок и отвечает титанавгиту. Содержания TiO₂ в них достигают 4.2 мас. %, Al₂O₃ – 7.4–7.7 мас. %, Na₂O до 0.4 мас. % (Прил. 1, табл. 1.2). Феррокерсутит характеризуется умеренной магниальностью (Mg#=0.4), содержит высокое количество TiO₂ (до 6.0 мас. %) и умеренное – K₂O (до 1.0 мас. %) (Прил. 1, табл. 1.3). Состав

реликтовых плагиоклазов в габброидах отвечает лабрадору (An_{50–60}). В щелочных сиенитах состав плагиоклаза соответствует альбиту и олигоклазу (An_{10–15}).

Геохимия. Для всех ультраосновных и основных пород Лысанского комплекса характерно повышенное содержание TiO₂, что связано с присутствием в них титаномагнетит-ильменитовых руд. При этом в оливинитах его содержание варьируется в диапазоне 2.5–6.5 мас. %, в пироксенитах – 3.8–8.7 мас. %, в габброидах – 1.3–4.8 мас. %. Оливинитам присущи очень низкие содержания щелочных, редких и редкоземельных элементов (рис. 2, а). Клинопироксениты и габброиды характеризуются повышенной щелочностью (Na₂O+K₂O=2.0–5.8 и 1.8–6.9 мас. % соответственно). Высокая щелочность габброидов подчеркивается присутствием в нормативном составе нефелина. В габброидах, кроме того, отмечается высокое содержание P₂O₅ (до 1.9 мас. %). Щелочные сиениты характеризуются

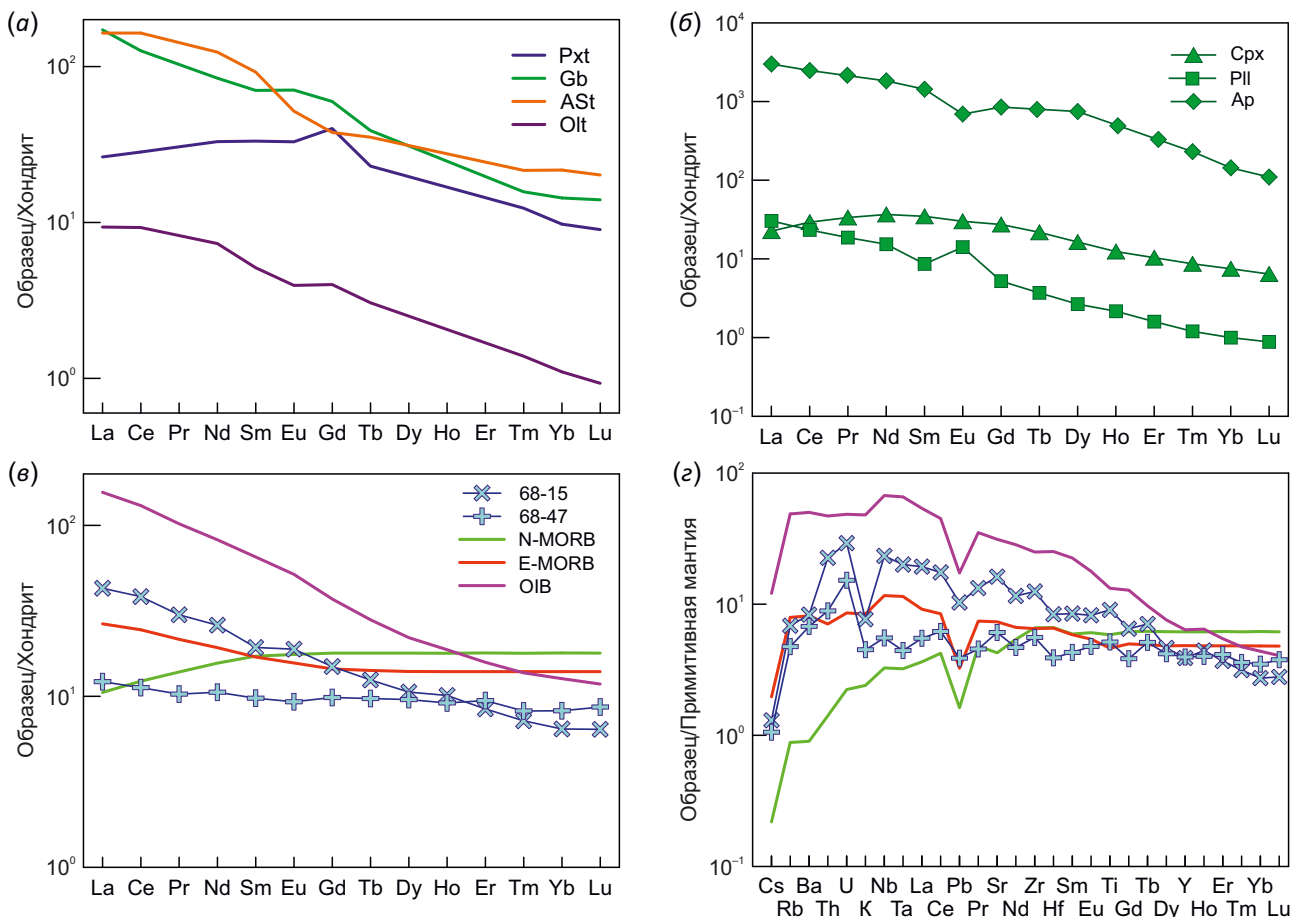


Рис. 2. Графики нормированного распределения редкоземельных и редких элементов. (а) – для пород Лысанского комплекса; (б) – для минералов из габбро Лысанского комплекса; (в–з) – для метабазальтоидов из бахтинской толщи. Pxt – клинопироксенит; Gb – габбро; ASt – щелочной сиенит; Olt – рудный оливинит; Cpx – клинопироксен; Pl – плагиоклаз; Ap – апатит; N-MORB – срединно-океанические базальты нормальные; E-MORB – срединно-океанические базальты обогащенные; OIB – базальты океанических островов (данные по [McDonough, Sun, 1995]).

Fig. 2. REE patterns normalized to C1 chondrite and trace element patterns normalized to primitive mantle values. (a) – rocks of the Lysan complex; (b) – minerals from the gabbro of the Lysan complex; (c–z) – metabasalts from the Bakhta sequence. Pxt – clinopyroxenite; Gb – gabbro; ASt – alkaline syenite; Olt – ore olivinite; Cpx – clinopyroxene; Pl – plagioclase; Ap – apatite; N-MORB – normal mid-oceanic basalts; E-MORB – enriched mid-oceanic basalts; OIB – oceanic island basalts (data from [McDonough, Sun, 1995]).

преобладанием Na_2O над K_2O и величиной коэффициента агаитности ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$) 0.6–0.8. Для всех типов пород характерно обогащение легкими редкими землями (рис. 2, а) и субпараллельное распределение нормированных по хондриту спектров редкоземельных элементов (РЗЭ). Судя по характеру распределения РЗЭ в минералах (рис. 2, б), основным минералом-концентратором РЗЭ в оливинитах, габброидах и сиенитах является апатит, а в пироксенитах – клинопироксен.

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование. Для изотопного датирования пород Лысанского интрузивного комплекса были выделены феррокерсутиты из пироксенитов Кедранского массива. В возрастном спектре образца 68-32 выделяется надежное плато, характеризующееся 98 % выделенного ^{39}Ar , в диапазоне 644.7 ± 5.2 млн лет (Прил. 2, рис. 2.1), что может соответствовать времени закрытия K-Ar изотопной системы минерала.

Амфиболиты бахтинской толщи, вмещающие массивы Лысанского интрузивного комплекса, образованы в условиях эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма. О принадлежности протолита амфиболитов к основному эффузивам свидетельствует отсутствие закономерного положения в осадочных ритмах, значительная протяженность тел при относительно небольшой мощности, реликты магматических структур – офитовой и порфировой. В целом для метабазальтоидов характерны низкая щелочность ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=2.2\text{--}2.7$ мас. %), умеренные содержания TiO_2 (1.0–1.9 мас. %). При этом для одних пластовых тел характерны повышенные содержания Ni и Cr (320 и 1500 г/т соответственно), для других низкие – 600 и 120 г/т соответственно. На диаграммах распределения РЗЭ (рис. 2, в, г) первые по уровню содержания цериевой группы РЗЭ ближе к E-MOR базальтам, а вторые демонстрируют плоский спектр РЗЭ на уровне десяти хондритовых отношений.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Как уже отмечалось выше, формационная принадлежность пород комплекса достаточно долго оставалась дискуссионной. Одним из принципиальных вопросов являлось определение происхождения и места ультраосновных пород в составе массивов [Glazunov, 1975; Boghibov et al., 2000], а также геодинамической природы метаэффузивов бахтинской толщи. Полученные новые данные по геохимии и минералогии пород Лысанского интрузивного комплекса позволяют отнести их к образованиям щелочно-ультраосновных комплексов. Большинство массивов таких комплексов (Ковдор, Африканда, Ингили и др.) имеет концентрически-зональное строение, и, в зависимости от уровня эрозионного среза, в них преобладает тот или иной тип пород. Массивы Лысанского интрузивного комплекса по набору пород и составу минералов наиболее близки к массиву Лесная Варака (Кольская щелочная провинция), геологическое строение которого существенно отличается от других массивов этой провинции [Kukharenskiy et al., 1965]. В его составе, так же как и в

изученных интрузиях, присутствуют рудные оливиниты и пироксениты, а также дайки щелочных сиенитов. Зона, в которой распространены породы Лысанского комплекса, находится на сопряжении двух крупных структурных единиц, что объясняет присутствие во вмещающей толще метабазальтоидов с различными геохимическими метками и тектонические контакты массивов Лысанского щелочно-ультраосновного комплекса с вмещающими толщами.

По всему протяжению южной окраины Сибирского кратона от Алданского щита до Енисейского кряжа прослеживаются позднерифейские щелочные комплексы [Yarmolyuk, Kovalenko, 2001; Yarmolyuk et al., 2005; Prokopyev et al., 2022], которые, как отмечалось выше, являются надежными трассерами зоны раскола Лавразии на Сибирский и Лаврентийский континенты. Полученный возраст пород Лысанского интрузивного комплекса (644.7 ± 5.2 млн лет) укладывается в диапазон 670–630 млн лет, который рассматривается как возраст максимальной внутриплитной активности вдоль края Сибирского кратона [Yarmolyuk et al., 2005].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные данные по геохимии, минералогии и возрасту пород Лысанского интрузивного комплекса позволяют сделать вывод, что они относятся к щелочно-ультраосновной формации. Их формирование происходило во внутриплитной обстановке. Возраст их образования соответствует позднему рифею и совпадает с таковым для щелочно-ультраосновных комплексов в южном обрамлении Сибирского кратона.

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

8. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Altukhov E.N., 1986. Tectonics and Metallogeny in the South of Siberia. Nedra, Moscow, 247 p. (in Russian) [Алтухов Е.Н. Тектоника и металлогения юга Сибири. М.: Недра, 1986. 247 с.].
- Bogdanova S.V., Pisarevsky S.A., Li Z.X., 2009. Assembly and Breakup of Rodinia (Some Results of IGCP Project 440). Stratigraphy and Geological Correlation 17 (3), 259–274. <https://doi.org/10.1134/S0869593809030022>.
- Boghibov V.I., Izokh A.E., Polyakov G.V., Gibsher A.S., Mekhonoshin A.S., 2000. Composition and Geodynamic Settings

of Formation of Titanium-Bearing Ultramafic-Mafic Massifs in the Central Asian Fold Belt. *Russian Geology and Geophysics* 41 (8), 1083–1097.

Cawood P.A., Strachan R.A., Pisarevsky S.A., Gladkochub D.P., Murphy J.B., 2016. Linking Collisional and Accretionary Orogens during Rodinia Assembly and Breakup: Implications for Models of Supercontinent Cycles. *Earth and Planetary Science Letters* 449 (1), 118–126. <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.05.049>.

Ernst R.E., Hamilton M.A., Soderlund U., Hanes J.A., Gladkochub D.P., Okrugin A.V., Kolotilina T.B., Mekhonoshin A.S. et al., 2016. Long-Lived Connection between Southern Siberia and Northern Laurentia in the Proterozoic. *Nature Geoscience* 9, 464–469. <https://doi.org/10.1038/ngeo2700>.

Glazunov O.M., 1975. *Geochemistry and Petrology of the Gabbro-Pyroxenite Formation of the Eastern Sayan*. Nauka, Novosibirsk, 216 p. (in Russian) [Глазунов О.М. Геохимия и петрология габбро-пироксенитовой формации Восточного Саяна. Новосибирск: Наука, 1975. 216 с.].

Kukharensko A.A., Orlova M.P., Bulakh A.G., Bagdasarov E.A., Rimskaya-Korsakova O.M., Nefedov E.I., Ilyinsky G.A., Sergeev A.S., Abakumova N.B., 1965. Caledonian Complex of Ultrabasic, Alkaline Rocks and Carbonatites of the Kola Peninsula and North Karelia. *Nedra, Moscow*, 772 p. (in Russian) [Кухаренко А.А., Орлова М.П., Булах А.Г., Багдасаров Э.А., Римская-Корсакова О.М., Неведов Е.И., Ильинский Г.А., Сергеев А.С., Абакумова Н.Б. Каледонский комплекс ультраосновных, щелочных пород и карбонатитов Кольского полуострова и Северной Карелии. М.: Недра, 1965. 772 с.].

Li Z.X., Bogdanova S.V., Collins A.S., Davidson A., De Waele B., Ernst R.E., Fitzsimons I.C.W., Fuck R.A. et al., 2008. Assembly, Configuration, and Break-Up History of Rodinia: A Synthesis. *Precambrian Research* 160 (1–2), 179–210. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.021>.

McDonough W.F., Sun S.-S., 1995. The Composition of the Earth. *Chemical Geology* 120 (3–4), 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4).

Mekhonoshin A.S., Volkova N.I., Kolotilina T.B., 2012. Metamorphism of the Alkhadyr Terrane (East Sayan). In: *Correlation of Altaides and Uralides: Magmatism, Metamorphism, Stratigraphy, Geochronology and Metallogenic Forecasting*. Proceedings of the Russian-Kazakh Conference (June 13 – August 28, 2012). Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, p. 47–50 (in Russian) [Мехоношин А.С., Волкова Н.И., Колотилина Т.Б. Метаморфизм Алхадырского террейна (Восточный Саян) // Корреляция алтаид и уралид: магматизм, метаморфизм, стратиграфия,

геохронология и металлогеническое прогнозирование: Материалы Российско-Казахстанского научного совещания (13 июня – 28 августа 2012 г.). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. С. 47–50].

Nozhkin A.D., Turkina O.M., Dmitrieva N.V., Travin A.V., Likhonov I.I., 2018. Metacarbonate-Terrigenous Complex of the Derba Block (East Sayan): Petrogeochemical and Isotope Parameters, Metamorphism, and Time of Formation. *Russian Geology and Geophysics* 59 (6), 652–672. <http://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.05.005>.

Prokopiev I.R., Doroshkevich A.G., Ponomarchuk A.V., Kruk M.N., Izbrodin I.A., Vladykin N.V., 2022 (in press). Geochronology of Alkaline-Ultrabasic Carbonatite Complex Arbarastakh (Aldan Shield, Yakutia): New Ar-Ar and U-Pb Data. *Geosphere Research* (in Russian) [Прокопьев И.Р., Дорошкевич А.Г., Пономарчук А.В., Крук М.Н., Избродин И.А., Владыкин Н.В. Геохронология щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса Арбарастах (Алданский щит, Якутия): новые Ar-Ar и U-Pb данные // Гео-сферные исследования. 2022 (в печати)].

Skuzovatov S.Yu., Belozeroва O.Yu., Vasil'eva I.E., Zarusbina O.V., Kaneva E.V., Sokolnikova Yu.V., Chubarov V.M., Shabanova E.V., 2022. Centre of Isotopic and Geochemical Research (IGC SB RAS): Current State of Micro- and Macro-analysis. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2), 0585 (in Russian) [Скузоватов С.Ю., Белозерова О.Ю., Васильева И.Е., Зарубина О.В., Канева Е.В., Сокольникова Ю.В., Чубаров В.М., Шабанова Е.В. Центр коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН: современное состояние методов изучения вещества на микро- и макроуровне. Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. 0585]. <http://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0585>.

Travin A.V., Yudin D.S., Vladimirov A.G., Khromykh S.V., Volkova N.I., Mekhonoshin A.S., Kolotilina T.B., 2009. Thermochronology of the Chernorud Granulite Zone, Ol'khon Region, Western Baikal Area. *Geochemistry International* 47 (11), 1107–1124. <https://doi.org/10.1134/s0016702909110068>.

Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., 2001. Late Riphean Breakup between Siberia and Laurentia: Evidence from Intraplate Magmatism. *Doklady Earth Sciences* 379, 525–528.

Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Nikiforov A.V., Sal'nikova E.B., Kotov A.B., Vladykin N.V., 2005. Late Riphean Rifting and Breakup of Laurasia: Data on Geochronological Studies of Ultramafic Alkaline Complexes in the Southern Framing of the Siberian Craton. *Doklady Earth Sciences* 404 (7), 1031–1036.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

Таблица 1.1. Представительные анализы оливина (мас. %) из рудных оливинитов Лысанского комплекса
Table 1.1. Representative electron microanalyses of olivine (wt. %) from ore olivinites of the Lysan complex

Образец	7831-1	7831-2	7831-3	7831-4	7831-5	7831-6	7831-7	7831-8
SiO ₂	38.68	38.90	39.17	39.00	39.47	39.36	39.31	39.22
FeO	19.58	19.46	19.06	18.70	17.96	18.24	18.20	18.45
MnO	0.28	0.28	0.32	0.31	0.26	0.28	0.31	0.30
MgO	40.75	41.11	41.03	41.24	42.57	41.89	41.89	41.84
CaO	0.19	0.18	0.19	0.28	0.20	0.20	0.24	0.21
NiO	0.15	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Сумма	99.63	99.93	99.77	99.53	100.46	99.97	99.94	100.01
Формульные количества на 4 O								
Si	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Fe	0.42	0.42	0.41	0.40	0.38	0.39	0.39	0.39
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	1.57	1.57	1.57	1.57	1.61	1.58	1.59	1.59
Ca	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Ni	0.00	-	-	-	-	-	-	-
Сумма	3.00	2.99	3.00	2.98	3.00	2.98	3.00	2.99

Примечание. н.о. – ниже предела обнаружения.

Note. н.о. – below detection limit.

Таблица 1.2. Представительные анализы клинопироксена (мас. %) из рудных оливинитов (1–6), пироксенов (7) и габбро (8) Лысанского комплекса**Table 1.2.** Representative electron microanalyses of clinopyroxene (wt. %) from ore olivinites (1–6), pyroxenites (7) and gabbro (8) of the Lysan complex

Образец	7831-1	7831-2	7831-3	7831-4	7831-5	7743	7841	7843
	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	45.00	44.90	45.00	45.50	45.30	49.74	50.85	50.82
TiO ₂	3.59	3.50	3.52	3.39	3.39	1.29	0.86	0.89
Al ₂ O ₃	7.11	7.15	6.93	7.03	7.04	3.99	3.10	2.78
Cr ₂ O ₃	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.81	0.44	0.16
FeO	6.58	6.88	6.98	6.89	6.94	5.57	6.03	7.03
MnO	0.11	0.11	0.10	0.10	0.05	0.11	0.12	0.17
MgO	12.60	12.70	12.70	12.80	12.80	15.23	16.44	16.16
CaO	23.00	23.10	23.40	23.50	23.20	22.32	21.61	21.11
Na ₂ O	0.70	0.55	0.55	0.55	0.45	0.36	0.32	0.26
Формульные количества на 6 O								
Si	1.712	1.708	1.709	1.715	1.716	1.852	1.882	1.893
Al (IV)	0.288	0.292	0.291	0.285	0.284	0.148	0.118	0.107
Al (VI)	0.031	0.028	0.019	0.028	0.031	0.027	0.017	0.015
Fe(III)*	0.152	0.155	0.165	0.156	0.138	0.076	0.094	0.083
Cr	–	–	–	–	–	0.024	0.013	0.005
Ti	0.103	0.100	0.101	0.096	0.097	0.036	0.024	0.025
Fe(II)	0.058	0.064	0.057	0.061	0.082	0.097	0.093	0.136
Mn	0.004	0.004	0.003	0.003	0.002	0.003	0.004	0.005
Mg	0.715	0.720	0.719	0.719	0.723	0.845	0.907	0.897
Ca	0.938	0.941	0.952	0.949	0.942	0.890	0.857	0.842
Na	0.052	0.041	0.040	0.040	0.033	0.026	0.023	0.019
Сумма	4.051	4.052	4.056	4.053	4.046	4.025	4.031	4.028
Wo	48.912	48.915	49.165	49.200	49.067	45.926	43.335	42.484
En	37.287	37.423	37.132	37.292	37.671	43.609	45.876	45.256
Fs	11.107	11.555	11.613	11.424	11.540	9.124	9.628	11.313
Ac	0.027	0.021	0.021	0.021	0.017	0.013	0.012	0.009

Примечание. н.о. – ниже предела обнаружения. *Fe³⁺ – рассчитано по стехиометрии минерала.Note. н.о. – below detection limit. *Fe³⁺ – calculated from the stoichiometry of the mineral.

Таблица 1.3. Представительные анализы феррокерсутита (мас. %) из пироксенитов Лысанского комплекса
Table 1.3. Representative electron microanalyses of ferrokaersutites (wt. %) from pyroxenites of the Lysan complex

Образец	6832-1	6832-2	6832-3
SiO ₂	38.19	39.41	39.46
TiO ₂	5.22	4.69	6.02
Al ₂ O ₃	13.36	13.44	12.51
FeO	20.35	19.93	17.97
MnO	0.38	0.31	0.27
MgO	6.63	7.36	8.50
CaO	12.21	11.36	11.69
Na ₂ O	1.70	1.66	1.19
K ₂ O	0.71	0.88	1.01
Сумма	98.76	99.04	98.62
Формульные количества на 23 O			
Si	5.846	5.968	5.968
Ti	0.601	0.534	0.534
Al	2.410	2.399	2.399
Cr	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	2.604	2.524	2.524
Mn	0.050	0.040	0.040
Mg	1.514	1.662	1.662
Ca	2.003	1.844	1.844
Na	0.506	0.487	0.487
K	0.139	0.170	0.170
Zr	0.000	0.000	0.000
Сумма	15.671	15.627	15.627

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 / APPENDIX 2

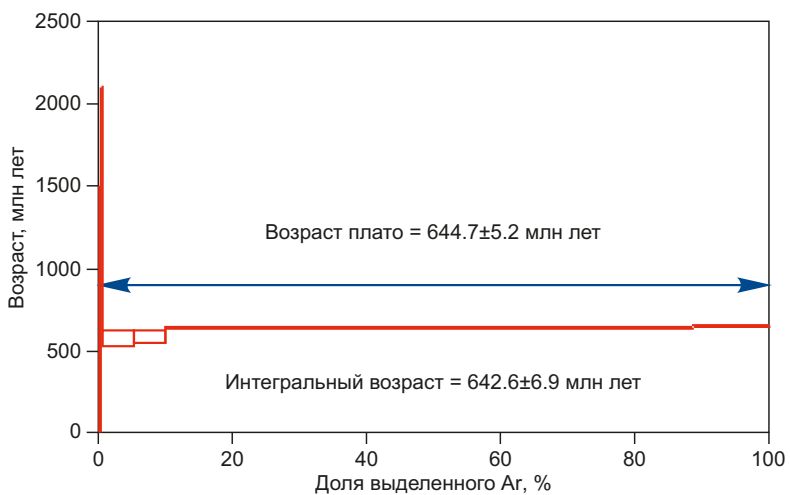
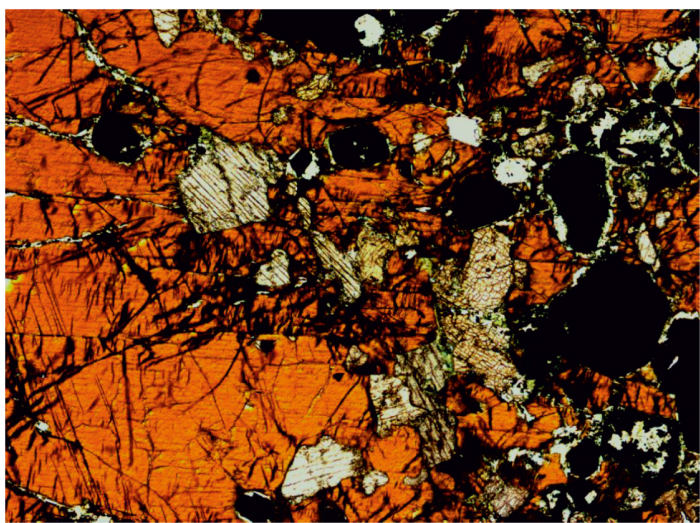


Рис. 2.1. Возрастной Ar-Ar-спектр феррокаерсутита из рудного пироксенита (обр. 6832-1, фото шлифа).
Fig. 2.1. Age Ar-Ar spectrum of ferrokaersutites from ore pyroxenite (sample 6832-1, thin section photo).