



## SEQUENCE OF AILLIKITE AND CALCITE CARBONATITE FORMATION WITHIN THE BELAYA ZIMA MASSIF, EAST SIBERIA, RUSSIA

S.M. Zhmodik <sup>✉</sup>, I.V. Ashchepkov , D.K. Belyanin , E.V. Airiyants , O.N. Kiseleva, V.A. Ponomarchuk

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

**ABSTRACT.** The mineralogical and geochemical features, as well as the sequence of formation of aillikite and calcite carbonatite (CC) with pyrochlore are described for the massif of alkaline ultramafic carbonatite complexes Belaya Zima located in East Siberia. Until now, mutually exclusive information presents the temporal relationships of carbonatites and lamprophyres of the Belaya Zima massif.

The sample marking the contact of aillikite and CC was comprehensive studied using analytical methods, e.g. XRF (ARL-9900XP spectrometer, ThermoFisher Scientific), ICP-MS (Element Finnigan MAT), SEM (MIRA 3 LMU (Tescan Ltd)), transmission and ore microscopy (AxioScope. A1, Zeiss),  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age determination of micas (Argus mass spectrometer, Micromass). The data obtained indicate a later formation of CC relative to aillikites and probable separation of the carbonatite melt from a single picrite-carbonatite source.

**KEYWORDS:** lamprophyre; carbonatite; aillikite; mineralogy; geochemistry; Belaya Zima massif

**FUNDING:** The work was accomplished for the state assignment of IGM SB RAS, with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

### SHORT COMMUNICATION

Received: June 20, 2022

Revised: August 1, 2022

Accepted: August 24, 2022

**Correspondence:** Sergey M. Zhmodik, [zhmodik@igm.nsc.ru](mailto:zhmodik@igm.nsc.ru)

**FOR CITATION:** Zhmodik S.M., Ashchepkov I.V., Belyanin D.K., Airiyants E.V., Kiseleva O.N., Ponomarchuk V.A., 2022. Sequence of Aillikite and Calcite Carbonatite Formation within the Belaya Zima Massif, East Siberia, Russia. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (4), 0654. doi:10.5800/GT-2022-13-4-0654

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ АЙЛИКИТОВ И КАЛЬЦИТОВЫХ КАРБОНАТИТОВ МАССИВА БЕЛАЯ ЗИМА (ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ, РОССИЯ)

С.М. Жмодик, И.В. Ащепков, Д.К. Белянин, Е.В. Айриянец, О.Н. Киселева, В.А. Пономарчук

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

**АННОТАЦИЯ.** Для массива ультраосновных щелочных пород и карбонатитов Белая Зима (Восточная Сибирь) описаны минералого-геохимические особенности и последовательность формирования айликитов и кальцитовых карбонатитов (КК) с пироксеном. До настоящего времени о временных взаимоотношениях карбонатитов и лампрофилов массива Белая Зима существуют взаимоисключающие сведения.

Проведено комплексное исследование образца, фиксирующего контакт айликита и КК, с применением методов: РФА (спектрометр ARL-9900XP, ThermoFisher Scientific), ИСП-МС (Element Finnigan MAT), СЭМ (MIRA 3 LMU (Tescan Ltd)), просвечивающей и рудной микроскопии (AxioScope. A1, Zeiss),  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  определения возраста слюды (масс-спектрометр Argus фирмы Micromass). Полученные данные свидетельствуют о более позднем формировании КК относительно айликитов и о вероятном отделении карбонатитового расплава от единого пикрит-карбонатитового источника.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** лампрофиры; карбонатиты; айликит; минералогия; геохимия; массив Белая Зима

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН, при поддержке Минобрнауки РФ.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В массивах ультраосновных щелочных пород и карбонатитов обязательным членом магматической ассоциации являются породы порфировой текстуры с большим количеством ксеноморфных включений минералов и пород. Несмотря на значительные вариации химического состава, все они относятся к щелочным ультрамафитам и определяются разными авторами как пикритовые порфириты, альнэиты, айликиты, лампроиты, кимберлитоподобные породы или кимберлиты, мелилититы, а в целом – лампрофиры. Во многих случаях эти образования исследованы гораздо в меньшей степени, нежели магматические силикатные породы и карбонатиты. Несмотря на длительную историю изучения Белозиминского комплекса ультраосновных пород и карбонатитов (расположен в предгорьях Восточного Саяна, в пределах Урикско-Ийского грабена), время формирования лампрофилов и их взаимоотношения с карбонатитами остаются неопределенными. В частности, в одной из первых капитальных работ, посвященных Белозиминскому массиву (БЗ), говорится о том, что пикритовые порфириты-альнэиты, по мнению геологов, изучавших БЗМ, образовались на этапе, который предшествовал формированию карбонатитов [Pozharitskaya, Samoilov, 1972]. В объяснительной записке к Государственной геологической карте РФ [State Geological Map..., 2019] отмечается то, что альнэиты (лампрофиры), распространенные в пределах БЗ, оказались формационно неопределенными, а их образование происходило после кристаллизации кальцитовых и анкеритовых карбонатитов. Во многих случаях о последовательности формирования лампрофилов и карбонатитов судить

сложно по причине их сонахождения в своеобразных «вулканических брекчиях» без признаков взаимодействия. Лампрофиры на БЗ и за его ближайшими пределами распространены в виде даек, жил, жиллообразных тел и диатрем [Chernyshova, 1991]. Нами был обнаружен образец, в котором отчетливо фиксируется зона взаимодействия карбонатита и лампрофира. Данная работа посвящена детальному описанию минералого-геохимических особенностей пород и последовательности их образования, т.е. относительно времени формирования карбонатитов и лампрофилов БЗ.

### 2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Образец, в котором фиксируется контакт карбонатита и лампрофира, был взят из скважины колонкового бурения, пробуренной на площади широкого распространения лампрофилов в северо-западной части БЗМ. Признаков гипергенного изменения минералов в породах не обнаружено. Нами было проведено комплексное минералого-геохимическое изучение образца с применением различных методов. Химический состав пород определен РФА методом на спектрометре ARL-9900XP, ThermoFisher Scientific (Швейцария), микроэлементный – масс-спектрометрическим методом с индуктивно связанной плазмой на приборе Element Finnigan MAT, состав и микроморфология минералов исследованы на сканирующем электронном микроскопе СЭМ MIRA 3 LMU (Tescan Ltd) с системой микроанализа INCA Energy 450+ XMax 80 (Oxford Instruments Ltd), а также методами просвечивающей и рудной микроскопии (AxioScope. A1, Zeiss), возраст определен по флюориметрическому  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  методом.



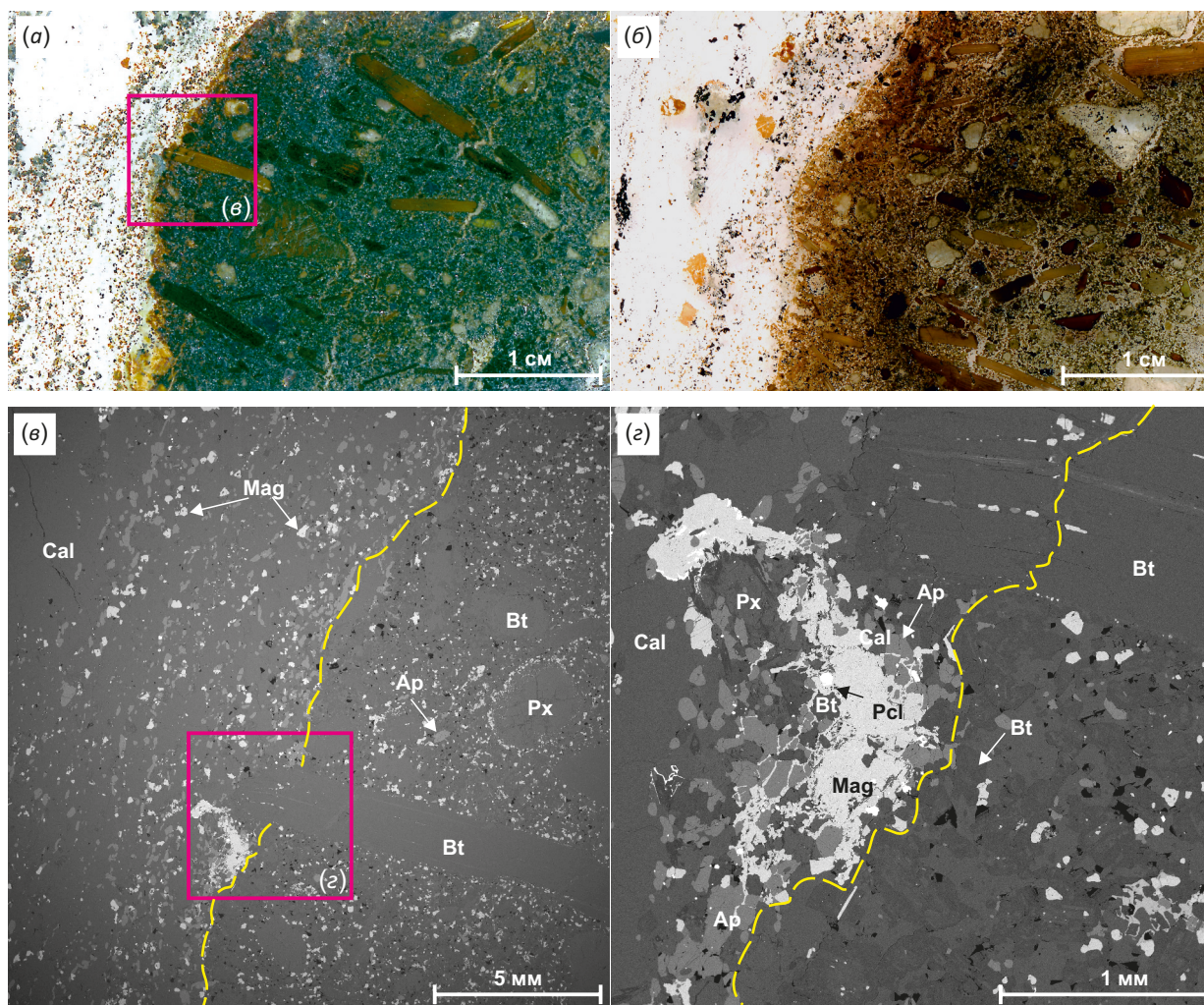
### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изученный образец представляет собой контакт меланократовой порфировой породы – лампрофира с карбонатитом (рис. 1). Лампрофир содержит относительно крупные (до 1 см и более) порфиновые вкрапления слюды и пироксена (до 0.5 см), расположенные в основной массе, состоящей из биотита, пироксена, магнетита, нефелина, кальцита, с аксессуарными – титанитом, с примесями ванадия (до 0.41 мас. %  $V_2O_5$ ) и ниобия (до 1.08 мас. %  $Nb_2O_5$ ), апатитом, РЗЭ-Nb-содержащими рутилом и перовскитом. Все вкрапления пироксена, представленного диопсидом – авгит-диопсидом, изменены в краевой части и имеют своеобразную кайму, состоящую (в различных соотношениях) из магнетита, мусковита, гиалофана, цельзиана, кальцита, титанита. Изменения в краевой зоне порфировых выделений биотита менее проявлены или отсутствуют. В кальците примеси MgO, MnO отсутствуют (<0.01 мас. %), и только FeO обнаружен в редких случаях

(0.19–0.32 мас. %). Содержание SrO в кальците лампрофира – от 1.01 до 1.25 мас. %.

Мелкозернистый карбонатит имеет полосчатую текстуру, обусловленную чередованием полос, в различной степени обогащенных темноцветными минералами (амфиболами, слюдами), с практически монокальцитовыми включениями (до 2–3 см). Главными минералами карбонатита являются кальцит с низкими содержаниями MgO (от 0–0.2 до 0.61 мас. %), MnO (от 0 до 0.23 мас. %), FeO (от 0 до 0.35 мас. %), SrO (от 0–0.4 до 1.09 мас. %), флогопит, тетраферрифлогопит, амфиболы (рихтерит, рибекит, арфведсонит), апатит, магнетит, ильменит, пирит, халькопирит, редко – барит.

Вдоль контакта карбонатита и лампрофира отчетливо проявлена зона бурого цвета, которая полностью исчезает в 0.5 см в глубь лампрофира (рис. 1). Порфировые выделения биотита на контакте слабокорродированны. Вдоль линии контакта фиксируются многочисленные «затёки» карбоната в окисленный лампрофир,



**Рис. 1.** Общий вид полированной пластины (а), шлифа (б) и изображения (SEM) образца (в, г), фиксирующего зону взаимодействия карбонатита с айликитом, в обратнорассеянных электронах. Ap – апатит, Bt – биотит, Cal – кальцит, Mag – магнетит, Pcl – пирохлор, Px – пироксен.

**Fig. 1.** General view of the polished section (a), thin section (б) and images (SEM) of the sample (в, г), marking the zone of interaction between carbonatite and aillikite. Ap – apatite, Bt – biotite, Cal – calcite, Mag – magnetite, Pcl – pyrochlore, Px – pyroxene.

**Таблица 1.** Химический состав (мас. %) лампрофира и карбонатита в образце BZ-461 массива Белая Зима  
**Table 1.** Chemical composition (wt. %) of lamprophyre and carbonatite in sample BZ-461 of the Belaya Zima massif

Порода	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O
Лампрофир	30.38	2.83	8.07	12.17	0.23	12.45	17.86	0.59
Лампрофир	29.67	2.97	7.47	13.57	0.23	11.85	18.29	0.68
Карбонатит	2.72	0.41	0.41	8.57	0.36	2.20	44.98	0.18
Порода	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	BaO	SO <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	SUM
Лампрофир	3.54	1.24	1.11	0.23	0.06	0.08	0.01	99.52
Лампрофир	3.06	1.39	0.93	0.53	0.05	0.06	0.01	99.42
Карбонатит	0.27	3.59	0.05	2.77	0.02	<0.01	<0.01	97.71

а со стороны карбонатита параллельно контакту располагается большое количество зерен пироклора, Nb-цирконолита, апатита и магнетита. В единичных зернах встречен Ce-La-монацит. Кальцит обогащен MgO (до 1.9 мас. %), MnO (до 1.92 мас. %), FeO (до 1.68–2.64 мас. %), а содержания SrO имеют максимальные вариации (от 0–0.27 до 1.43 мас. %). Пироклолы во многих случаях представлены идиоморфными или «оплавленными» кристаллами с гетерогенным внутренним строением, обусловленным диффузной эвгедральной, секториальной зональностью и пятнистой неоднородностью. Состав пироклолов значительно варьируется. По соотношениям Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> с F, Na<sub>2</sub>O, SrO, Th<sub>2</sub>O, U<sub>2</sub>O выделяется четыре группы пироклолов, в которых «примесные» компоненты меняют концентрации от 0 до 5–10 мас. %. Содержания «минералообразующих» компонентов также варьируются в широких пределах: от 8.4 до 18.7 мас. % CaO, от 1.2 до 3.0 мас. % PЗЭ (Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), от 3.8 до 12.56 мас. % TiO<sub>2</sub>.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Химический состав лампрофира и карбонатита представлен в табл. 1, и он соответствует ультрамафитовым лампрофиром (UML) [Rock, 1991] и кальцитовым карбонатитам [Pozharitskaya, Samoilov, 1972]. Минеральный состав лампрофира, наличие в составе его основной массы кальцита и отсутствие мелилита позволяют классифицировать породу как айликит (АЛ). В сравнении с типичным айликитом Айлик Бэй Лабрадор [Tappe et al., 2006] белозиминские АЛ более глиноземистые, карбонатные и щелочные, но с пониженными содержаниями TiO<sub>2</sub>, а по остальным компонентам наблюдается полное соответствие. Распределение PЗЭ и характер спайдер-диаграмм айликитов массива Белая Зима и Айлик Бэй во многом аналогичны [Tappe et al., 2006; Ashchepkov et al., 2020].

Минеральный и химический состав изученного КК соответствует кальцитовым карбонатитам третьей стадии [Pozharitskaya, Samoilov, 1972], для которых характерными минералами являются кальцит, рихтерит, магнезиоарфведсонит, тетраферрифлогопит, магнетит, апатит, ильменит, пироклор. В КК обнаружен редко встречающийся минерал, соответствующий ряду лаахит – Nb-FeЗ+цирконолит, ранее описанный для

КК данного массива [Sharygin et al., 2016]. Широкие вариации состава пироклолов, а также наличие секториальности кристаллов и неровных границ между секторами роста свидетельствуют о нестационарности условий кристаллизации, что может быть связано с небольшими объемами расплава, в котором быстро достигается пересыщение [Kaulina, 2011].

Значения изотопного состава углерода и кислорода ( $\delta^{13}\text{C}=-5,7$ ,  $\delta^{18}\text{O}=9.7$  ‰) кальцитового карбонатита (обр. БЗ-461) находятся в пределах мантийных значений (бокс Тейлора), определенных для первичных карбонатитов, имеющих параметры для  $\delta^{13}\text{C}$  –4...–8 ‰ и  $\delta^{18}\text{O}$  – 6–10 ‰. Эти данные свидетельствуют в пользу магматической природы КК.

Возраст айликитов нами определен <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar-методом по биотитам и составляет 632.6±6.3 млн лет (обр. БЗ-460) и 640.3±6.5 млн лет (обр. БЗ-451) [Ashchepkov et al., 2020]. Ar-Ar-возраст флогопита из кальцит-доломитовых карбонатитов массива Белая Зима имеет значение 645±6 млн лет [Doroshkevich et al., 2016], а изохронный возраст пород массива – 631 ±11 млн лет [Khromova, 2020]. Таким образом, можно говорить о близком возрасте формирования айликитов и карбонатитов массива Белая Зима, что, по-видимому, свидетельствует о формировании КК и АЛ из единого расплава.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пространственные взаимоотношения и минерало-геохимические особенности зоны взаимодействия кальцитового карбонатита и айликита свидетельствуют о более раннем времени формирования айликита. Главными доказательствами этого вывода являются: 1) широкое проявление карбонатизации АЛ прежде всего в зоне взаимодействия с КК, с коррозией основной массы лампрофира и проникновением карбоната по «дефектным» зонам; 2) наличие корродированных порфиробластов биотита, выступающих за границу взаимодействия КК и АЛ; 3) возникновение «зоны окисления» в АЛ вдоль линии взаимодействия КК и АЛ; 4) обогащение кальцита в зоне взаимодействия КК и АЛ MgO, FeO, MnO, SrO и микроэлементами; 5) изменение вкрапленников диопсида в АЛ около зоны взаимодействия с формированием оторочки из кальцита, магнетита, мусковита, гиалофана, цельзиана и титанита.



Данные о возрасте Ал массива Белая Зима существенно отличаются от возраста, определенного для кимберлитов ингашинского комплекса [State Geological Map..., 2019].

## 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят А.В. Травина, Н.С. Карманова, И.В. Николаеву, С.В. Палесского за выполнение аналитических работ методами  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования, СЭМ и ИСП-МС в ЦКП МИИ СО РАН, Т.Б. Колотилину – за помощь и поддержку, а также Б.Б. Дамдинова и А.В. Толстова – за доброжелательные и содержательные отзывы.

## 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

Ashchepkov I., Zhmodik S., Belyanin D., Kiseleva O., Medvedev N., Travin A., Yudin D., Karmanov N., Downes H., 2020. Aillikites and Alkali Ultramafic Lamprophyres of the Beloziminsky Alkaline Ultrabasic-Carbonatite Massif: Possible Origin and Relations with Ore Deposits. *Minerals* 10 (5), 404. <http://doi.org/10.3390/min10050404>.

Chernyshova E.A., 1991. Geochemistry and Petrology of Dike Rocks of the Lower Sayan Carbonatite Complex. *Geochemistry* 8, 1096–1110 (in Russian) [Чернышова Е.А. Геохимия и петрология дайковых пород нижнесаянского карбонатитового комплекса // Геохимия. 1991. № 8. С. 1096–1110].

Doroshkevich A.G., Veksler I.V., Izbrodin I.A., Ripp G.S., Khromova E.A., Posokhov V.F., Travin A.V., Vladykin N.V., 2016. Stable Isotope Composition of Minerals in the Belaya Zima Plutonic Complex, Russia: Implications for the Sources of

the Parental Magma and Metasomatizing Fluids. *Journal of Asian Earth Sciences* 116, 81–96. <http://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.11.011>.

Kaulina T.V., 2011. Formation and Transformation of Zircon in Polymetamorphic Complexes. Brief PhD Thesis (Doctor of Geology and Mineralogy). Apatity, 38 p. (in Russian) [Каулина Т.В. Образование и преобразование циркона в полиметаморфических комплексах: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Апатиты, 2011. 38 с.].

Khromova E.A., 2020. The Age and Petrogenesis of Rocks of Alkaline-Ultrabasic Carbonatite Massif of Belaya Zima in East Sayan Mts. PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Ulan-Ude, 164 p. (in Russian) [Хромова Е.А. Возраст и петрогенезис пород щелочно-ультраосновного карбонатитового Белозиминского массива (Восточный Саян): Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Улан-Удэ, 2020. 164 с.].

Pozharitskaya L.K., Samoilov V.S., 1972. Petrology, Mineralogy and Geochemistry of Carbonatites in Eastern Siberia. Nauka, Moscow, 265 p. (in Russian) [Пожарицкая Л.К., Самойлов В.С. Петрология, минералогия и геохимия карбонатитов Восточной Сибири. М.: Наука, 1972. 265 с.].

Rock N.M.S., 1991. Lamprophyres. Springer, New York, 282 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0929-2>.

Sharygin V.V., Doroshkevich A.G., Khromova E.A., 2016. Nb-Fe-Rich Zirconolite Group Minerals in Calcite Carbonatites of the Belaya Zima Massif (Eastern Sayan). *Mineralogy* 4, 3–18 (in Russian) [Шарыгин В.В., Дорошкевич А.Г., Хромова Е.А. Nb-Fe-минералы цирконолита в кальцитовых карбонатитах Белозиминского массива (Восточный Саян) // Минералогия. 2016. № 4. С. 3–18].

State Geological Map of the Russian Federation, 2019. East Sayan Series. Scale 1:200000. Sheet N-47-XXIII (Belaya Zima). Explanatory Note. Moscow Branch of VSEGEI, Moscow, 132 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Восточно-Саянская. Масштаб 1:200000. Лист N-47-XXIII (Белая Зима): Объяснительная записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2019. 132 с.].

Tappe S., Foley S.F., Jenner G.A., Heaman L.M., Kjarsgaard B.A., Romer R.L., Stracke A., Joyce N., Hoefs J., 2006. Genesis of Ultramafic Lamprophyres and Carbonatites at Aillik Bay, Labrador: A Consequence of Incipient Lithospheric Thinning beneath the North Atlantic Craton. *Journal of Petrology* 47 (7), 1261–1315. <https://doi.org/10.1093/petrology/egl008>.