

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ И Sr–Nd–Pb ИЗОТОПНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОД И КАРБОНАТИТОВ БЕЛОЗИМИНСКОГО МАССИВА (ВОСТОЧНЫЙ САЯН)



Е.А. Хромова¹, А.Г. Дорошкевич^{1,2}, И.А. Избродин¹

¹ Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

² Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

Приведены результаты петролого-геохимического изучения, включая радиогенные (Nd, Pb и Sr) изотопные составы, для щелочных пород Белозиминского массива (Восточный Саян, Россия). Исходные изотопные отношения Nd, Pb и Sr варьируют и предполагают генерацию расплава из гетерогенного мантийного источника с умеренно деплетированными изотопными характеристиками. По результатам петрографических, минералогических и петрохимических исследований определено, что образование щелочных силикатных пород массива связано с процессом кристаллизационной дифференциации. Геохронологические Pb–Pb изотопные результаты для щелочных пород дают значения 631 ± 11 млн лет, что в совокупности с полученными ранее датировками по массиву, свидетельствует о довольно узком интервале времени их формирования. Их становление связано с завершающим этапом распада суперконтинента Родинии.

Ключевые слова: Белозиминский массив, карбонатиты, щелочные силикатные породы, изотопные данные, мантийные источники, возраст, раскол суперконтинента Родиния.

Введение

Несмотря на длительную историю изучения щелочных карбонатитовых комплексов, до сих пор остается актуальной проблема карбонатитового магматизма, так как он представляет огромный научный интерес и несет уникальную информацию о процессах, протекающих в верхней мантии. Карбонатитовые магмы обладают чрезвычайно низкой вязкостью, что, несомненно, позволяет им отделяться от мантийного источника при очень низких степенях частичного плавления. Такие расплавы характеризуются высоким содержанием в составе широкого спектра некогерентных литофильных элементов. Особенность этих магм важна для изучения мантии под континентами, так как геохимическая информация о мантийных источниках карбонатитовых магм, основанная на соотношениях некогерентных микроэлементов и их изотопов, не искажается коровой контаминацией [Bell, 2001].

Белозиминский массив расположен на территории Восточного Саяна на юге Сибирской платформы (рис. 1) и входит в состав Восточно-Саянской щелочной провинции [Зоненшайн, 1990; Фролов и др., 2003]. С начала 50-х гг. прошлого столетия многие исследователи [Гайдукова, Здорик, 1962; Пожарицкая, 1962; Березина, 1972; Пожарицкая, Самойлов, 1972; Сомина, 1975; Панина, Подгорных, 1975, 1979; Багдасаров, Вороновский, 1980; Субботин, Субботина, 2000; Фролов и др., 2003; Андреева и др., 2004, 2007; Андреева, 2014; Doroshkevich et al., 2016; Хромова и др., 2017] давали подробную геологическую и минералого-петрографическую характеристику пород массива. Лишь несколько работ посвя-

щено Sr–Nd изотопии по породам щелочных массивов Восточно-Саянской провинции [Morikiyo et al., 2000; Владыкин, 2005; Никифоров, Лыхин, 2007, 2008]. Авторы продемонстрировали, что породы характеризуются обедненным Sr–Nd составом, а разброс значений связан со смешением двух мантийных компонентов. Хотя данные по изотопам Pb являются мощным инструментом в изучении характеристик источников щелочных карбонатитовых комплексов, включая тот факт, что изотопы Pb являются более чувствительными индикаторами коровой контаминации, чем Sr и Nd изотопы (см., напр.: [Andersen, Taylor, 1988; Kwon et al., 1989; Cimen et al., 2019 и др.], на сегодняшний день нет опубликованных Pb изотопных анализов для щелочных пород Восточно-Саянской провинции.

Полученные нами микроэлементные данные и новые определения изотопного состава стронция, неодима и свинца дают возможность рассмотреть источники вещества и геохимическую эволюцию Белозиминского массива, обсудить полученный Pb/Pb возраст и геодинамические следствия.

Методы исследования

Определения химического и микроэлементного состава пород осуществлялись в Аналитическом Центре минералого-геохимических и изотопных исследований ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ) и Институте геохимии СО РАН (г. Иркутск) с использованием традиционных методов анализа и ICP-MS.

Измерения изотопного состава неодима и концентраций Sm и Nd проводились в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН (г. Санкт-

Петербург, аналитик Саватенков В.М.) на многоколлекторном твердофазном масспектрометре Triton. Для выделения Sm и Nd использована методика, подробно описанная в работе [Savatenkov et al., 2004]. Воспроизводимость определения концентраций Rb,

Sr, Sm и Nd, вычисленная на основании многократных анализов стандарта BCR-1, соответствует $\pm 0,5\%$. Величина холостого опыта составляла: 0,05 нг для Rb, 0,2 нг для Sr, 0,3 нг для Sm и 0,8 нг для Nd.

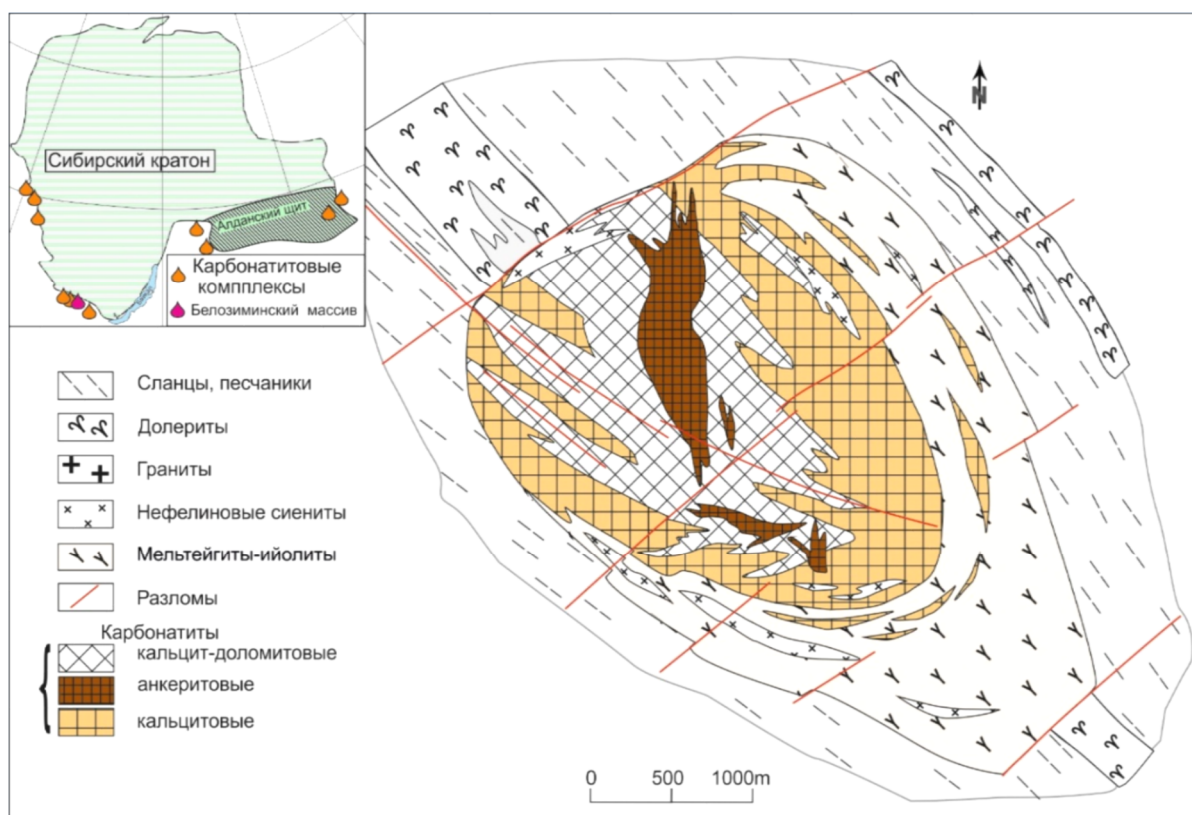


Рис. 1. Географическое положение и схема геологического строения Белозиминского массива по данным [Фролов и др., 2003]

Fig. 1. Geographical location and geological structure of the Belaya Zima carbonatite complex according to [Frolov et al., 2003]

Результаты анализа стандартного образца BCR-1 (6 измерений): $[Sr] = 336,7$ мг/г, $[Rb] = 47,46$ мг/г, $[Sm] = 6,47$ мг/г, $[Nd] = 28,13$ мг/г, $^{87}Rb/^{86}Sr = 0,4062$, $^{87}Sr/^{86}Sr = 0,705036 \pm 22$, $^{147}Sm/^{144}Nd = 0,1380$, $^{143}Nd/^{144}Nd = 0,512642 \pm 14$. Воспроизводимость изотопных анализов контролировалась определением состава стандартов La Jolla и SRM-987. За период измерений Sr полученное значение $^{87}Sr/^{86}Sr$ в стандарте SRM-987 соответствовало $0,710241 \pm 15$ (2 σ , 10 измерений), а величина $^{143}Nd/^{144}Nd$ в стандарте La Jolla составила $0,511847 \pm 8$ (2 σ , 12 измерений). Изотопный состав Sr нормализован по величине $^{88}Sr/^{86}Sr = 8,37521$, а состав Nd – по величине $^{146}Nd/^{144}Nd = 0,7219$. Изотопный состав приведен к табличному значению стандарта La Jolla ($^{143}Nd/^{144}Nd = 0,511860$).

Измерения Pb-изотопного состава выполнены в ЦИИ ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург). Свинец анализировали на масс-спектрометре TRITON в однолучевом варианте в статическом многоколлекторном режиме. Измерялись отношения изотопов свинца

$^{206}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{204}Pb$ и $^{208}Pb/^{204}Pb$, каждое из них состояло из 50 блоков по 10 сканов при токе на испарителе 2,2–2,3 А и температуре 1300°C. Перед каждой партией проб измерялся стандарт – 50 нг NIST 981. Средняя точность анализов составила 0,05% (2 σ) для отношения $^{206}Pb/^{204}Pb$. Корректировка на приборное масс-фракционирование производилась по среднему значению измерений стандарта NIST 981 ($^{206}Pb/^{204}Pb = 16,9374$, $^{207}Pb/^{204}Pb = 15,4916$, $^{208}Pb/^{204}Pb = 36,7219$) при той же температуре. Измеренные отношения изотопов свинца корректировались на масс-фракционирование 0,120% а.е.м. для $^{206}Pb/^{204}Pb$ и $^{207}Pb/^{204}Pb$; 0,135% а.е.м. для $^{208}Pb/^{204}Pb$. Бланк (холостой опыт) во время проведения анализов не превышал 0,2 нг для Pb. Его состав: $^{206}Pb/^{204}Pb = 18,120$, $^{207}Pb/^{204}Pb = 15,542$, $^{208}Pb/^{204}Pb = 37,354$. Соотношение свинца бланка к пробе не превышало 1/200 000, поэтому поправка на содержание холостого свинца для измеренных отношений не вводилась.

Геологическое строение и вещественный состав пород массива

Белозиминский массив приурочен к одноименному ультраосновному щелочному комплексу, занимающему центр Зиминского рудного района. Характеризуется кольцевым строением, осложненным линейными структурами, и располагается на большую глубину [Фролов, 1975].

Белозиминский массив является многофазной интрузией центрального типа, занимающей на поверхности площадь около 18 км². Массив несколько вытянут в северо-западном направлении согласно простиранию контролирующего его разлома. Вмещающими являются породы песчано-сланцевой толщи верхнего протерозоя с пластами кварцитов и согласными дайками диабазов. Центр массива – сложно построенный шток площадью около 10 км², выполненный

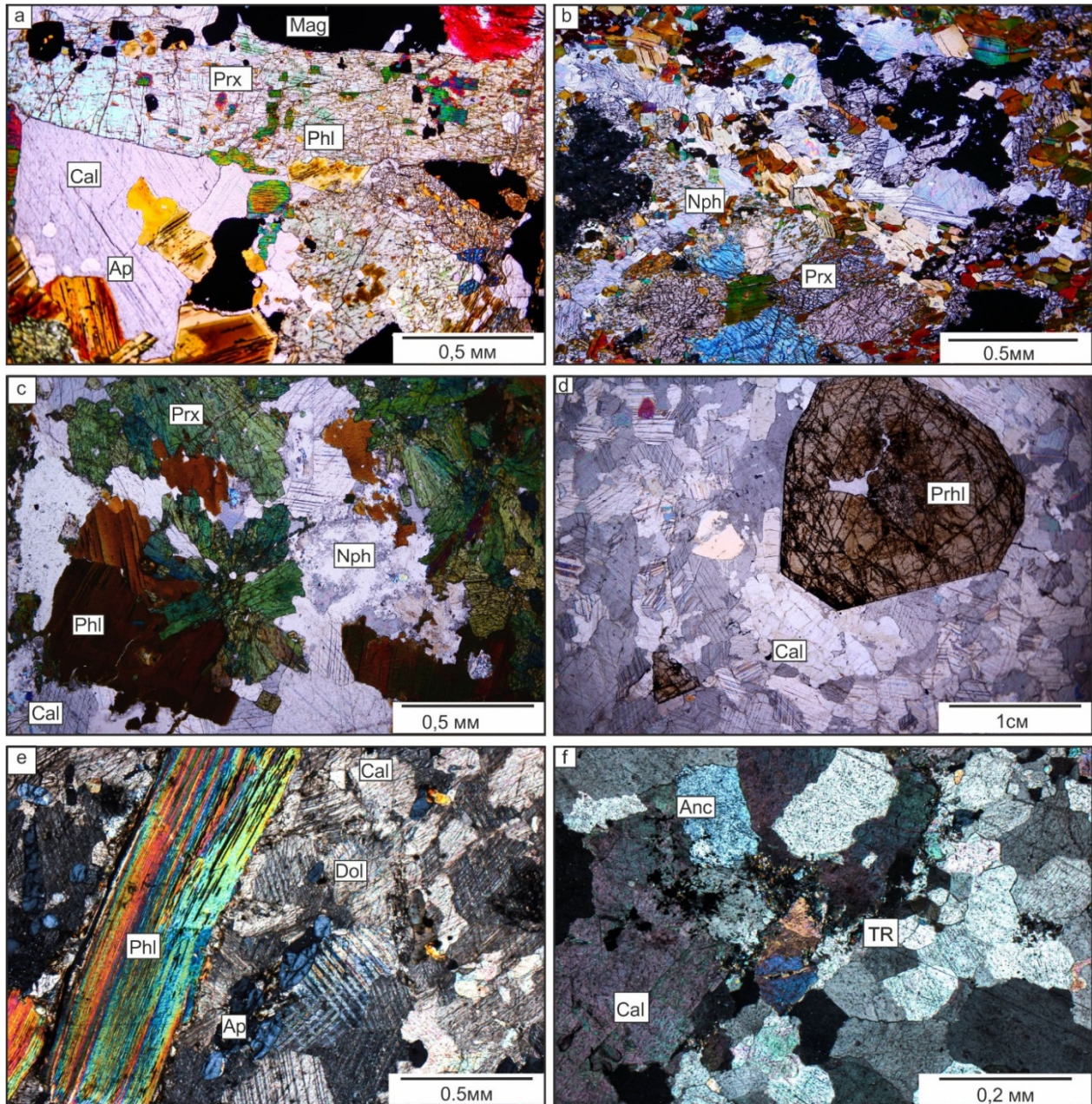


Рис. 2. Микрофотографии текстур и соотношений минералов щелочных пород Белозиминского массива
а – мельтейгит; б – ийолит; с – нефелиновый сиенит; д – кальцитовый карбонатит; е – кальцит-доломитовый карбонатит; ф – анкеритовый карбонатит. Mag – магнетит; Prx – пироксен; Phl – флогопит; Cal – кальцит; Ap – апатит; Nph – нефелин; Prhl – пироклор; Dol – доломит; Anc – анкерит; TR – карбонаты редкоземельных элементов

Fig. 2. Microphotographs of textures and relationship of minerals of alkaline rocks of the Belaya Zima carbonatite complex

а – melteigite; б – ijolite; с – nepheline syenite; д – calcite carbonatite; е – calcite-dolomite carbonatite; ф) ankerite carbonatite. Mag – magnetite; Prx – pyroxene; Phl – phlogopite; Cal – calcite; Ap – apatite; Nph – nepheline; Prhl – pyrochlore; Dol – dolomite; Anc – ankerite; TR – rare earth carbonates

карбонатитами и прослеженный бурением до глубины 1,5 км. Щелочные силикатные породы представлены мельтейгитами, ийолитами, нефелиновыми сиенитами, они образуют полукольцевое тело, обрамляющее карбонатитовый шток по периферии (см. рис. 1).

Контакты между мельтейгитами и ийолит-уртитамы постепенные. Нефелиновые сиениты представлены дайкообразными телами мощностью до первых сотен метров и располагаются в поле распространения мельтейгитов и ийолитов, контакты интрузивные, хорошо различимые.

Мельтейгиты сложены клинопироксеном (60–90%), нефелином (5–40%), перовскитом (5–15%) и магнетитом (5–10%). Второстепенные минералы представлены флогопитом, амфиболом, титанитом, гранатом, ильменитом, которые в сумме занимают порядка 5%. Стоит отметить, что в отдельных случаях, количество перовскита в породе достигает 12–15%, иногда зерна минерала обрастают тонкой каймой граната. К акцессорным относятся кальцит, рутил, бадделейт. Вторичные минералы представлены группами канкринита и хлорита (рис. 2, а, табл. 1).

Породы ийолит-уртитового ряда сложены варьирующими количествами нефелина и клинопироксена. Субидиоморфные зерна нефелина составляют 50–60%, крупные таблитчатые кристаллы клинопироксена – 30–40%. Второстепенные минералы (до 5%) – гранат, перовскит, магнетит, кальцит и апатит. Иногда содержание граната в породе достигает 15%. К акцессорным относятся бадделейт, ильменит, титанит, рутил, циркон, пирит, сфалерит, халькопирит. Вторичные минералы представлены группами канкринита, либнерита, хлорита, мусковита (рис. 2, б, табл. 1).

Основными породообразующими минералами в нефелиновых сиенитах являются калиевый полевой шпат (25–40%), который представлен ортоклазом, нефелин (20–45%), клинопироксен (до 20%). Соотношение полевого шпата и нефелина колеблется в широких пределах. Второстепенные минералы – щелочной амфибол, флогопит, кальцит, апатит. К акцессорным относятся пироксенол, фтороапатит, титанит, циркон, баритокальцит, ториацит, ильменит, рутил, (рис. 2, с, табл. 1).

Процентное содержание минералов в породах Белозиминского массива

Таблица 1

Table 1

The content of mineral in the rocks of the Belaya Zima complex

Порода	Минерал (%)								
	Nph	cPrx	Kpfs	Gt	Prv	Ttn	Cal	Ap	Prhl
Мельтейгит	5–40	60–90	–	0–1	5–15	Ед. зн.	1–2	1–3	–
Ийолит	50–60	30–40	Ед. зн.	5–15	Ед. зн.	2–5	1–2	1–3	–
Нефелиновый сиенит	20–45	10–20	25–40	–	–	Ед. зн.	0–3	2–5	0–1

Примечание. Прочерк – не обнаружено; Ед. зн. – единичные знаки. Nph – нефелин; cPrx – клинопироксен; Kpfs – калиевый полевой шпат; Gt – гранат; Prv – перовскит; Ttn – титанит; Cal – кальцит; Ap – апатит; Prhl – пироксенол.

Note. Dash – not detected; Units characters – single characters. Nph – nepheline; cPrx – clinopyroxene; Kpfs – potassium feldspar; Gt – garnet; Prv – perovskite; Ttn – titanite; Cal – calcite; Ap – Apatite; Prhl – pyrochlore.

Карбонатиты представлены кальцитовыми, кальцит-доломитовыми и анкеритовыми разновидностями. Они являются носителями всей разнообразной рудной минерализации. Основные их структурные элементы: крупный шток, линейные жилы в тектонических трещинах. Карбонатитовый шток немного смещен к северо-западу относительно центра массива. Среди карбонатитов описаны останцы силикатных пород, расположенные в основном по периферии штока [Фролов и др., 2003].

Кальцитовые карбонатиты, как правило, представлены крупнозернистыми, массивными разновидностями. Породы сложены кальцитом с второстепенными клинопироксеном, флогопитом, магнетитом, оливином. Кальцит-доломитовые карбонатиты – это среднезернистые, порфировидные, часто полосчатые породы, состоящие преимущественно из доломита и кальцита с подчиненным количеством слюды, реже амфибола и клинопироксена. В кальцитовых и кальцит-доломитовых разновидностях карбонатитов встречаются гидроксил-фтороапатит, минералы группы пироксенола.

Акцессорные фазы представлены минералами группы цирконолита, баотитом, цирконом, колумбитом, рутилом, бадделейтом, анкилитом-(Ce), минералами группы бурбанкита, катаплеитом, хилариитом, фторкарбонатами РЗЭ (бастнезит-(Ce), синхизит-(Ce)), монацитом-(Ce), торитом и другими [Бородин, 1962; Гайдукова, 1962; Пожарицкая, 1972; Багдасаров, 1974; Сомина, 1975; Булах, 1984; Фролов и др., 2003; Doroshkevich et al., 2016; Шарыгин, 2016; Khromova et al., 2017]. Анкеритовые разновидности карбонатитов – среднезернистые, пятнистые, реже полосчатые. Главными минералами являются анкерит и доломит, второстепенными и акцессорными – барит, сульфиды (в основном пирит), монацит-Ce, фторкарбонаты РЗЭ (рис. 2, д, е, ф).

Возраст пород Белозиминского массива

Возраст пород Белозиминского массива по геологическим данным оценивался как постнижнедевонский (средний палеозой). Данные абсолютного возраста варьируют в широких пределах от 280 млн лет

в карбонатитах, до 720–590 млн лет по щелочным породам [Фролов и др., 2003]. Результаты K–Ar методом по флогопиту из кальцитовых карбонатитов составил 543 ± 3 млн лет [Багдасаров, Вороновский, 1980].

Датирование нефелиновых сиенитов, проведенное U–Pb методом по циркону, составляет 643 ± 3 млн лет [Ярмолук и др., 2005]. Возраст ийолитов, определенный U–Pb методом по гранату, равен 645 ± 6 млн лет [Salnikova et al., 2019]. Определение возраста Ar–Ar методом по флогопиту из кальцит-доломитовых карбонатитов [Doroshkevich et al., 2016] соответствует 645 ± 6 млн лет и хорошо согласуется с возрастом нефелиновых сиенитов и ийолитов.

Петрологическая и геохимическая характеристика пород

Петрохимические и геохимические данные по щелочным силикатным породам Белозиминского месторождения представлены в табл. 2.

Мельтейгиты характеризуются минимальным содержанием кремнекислотности среди щелочных силикатных пород комплекса. Сумма Na_2O и K_2O варьирует в широких пределах и достигает 8 мас. % (рис. 3, а). Отношение натрия к калию колеблется от 0,5 до 2,5. Коэффициент агпаитности ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$) мельтейгитов меньше единицы (рис. 3, б, табл. 2).

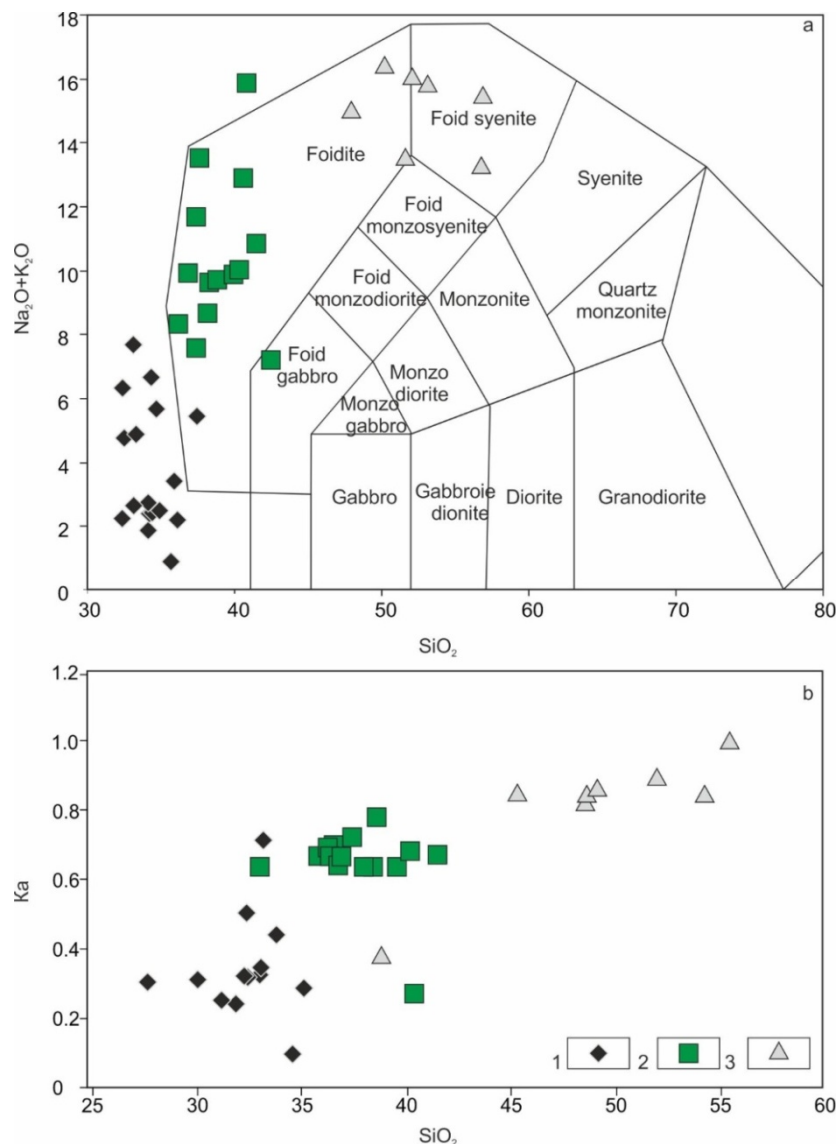


Рис. 3. Классификация (а) и соотношение SiO_2 и коэффициента агпаитности (Ka) (б) в ультраосновных щелочных породах и щелочных сиенитах Белозиминского массива
1 – мельтейгиты, 2 – ийолиты, 3 – щелочные сиениты. Для построения графиков частично использованы данные [Чернышева и др., 1994; Андреева и др., 2007]

Fig. 3. Classification (a) and ratio of SiO_2 and agpaite coefficient (Ka) (b) in ultrabasic alkaline rocks and alkaline syenites of the Belaya Zima carbonatite complex
1 – melteygites, 2 – ijolites, 3 – alkaline syenites. Graphs were built with partially used data from [Kononova, Chernyshova, 1994; Andreeva, 2007]

Таблица 2

Химический состав представительных образцов щелочных пород исследуемых массивов

Table 2

The chemical composition of representative samples of alkaline rocks of the investigated complexes

Номер образца, мас. %	Мельтейгиты			Йоилиты			Нефелиновые сиениты		
	2309-109-114	2092-761-763	01-151	И-2092	2095-226-231	520-95-99	С1/135-144	С1-131-137	С1-158-163
SiO ₂	33,40	31,40	27,90	37,20	38,80	40,50	49,30	54,40	50,62
TiO ₂	3,99	5,01	6,30	2,79	1,64	2,53	0,25	0,30	0,57
Al ₂ O ₃	7,00	7,20	6,50	13,20	13,40	14,60	18,20	18,00	18,05
Fe ₂ O ₃	2,99	8,18	10,41	6,28	2,40	3,33	1,97	1,86	3,83
FeO	9,32	7,68	9,91	4,70	11,28	14,06	2,73	1,37	2,83
MnO	0,44	0,32	0,44	0,18	0,50	0,23	0,12	0,12	0,17
MgO	7,44	8,49	8,20	4,52	11,73	4,80	1,25	1,17	1,03
CaO	19,10	22,89	20,75	18,00	3,57	4,35	5,60	3,63	4,33
Na ₂ O	1,44	1,05	1,41	5,72	2,10	2,62	7,79	5,87	8,27
K ₂ O	3,46	0,73	0,52	2,83	8,16	1,17	7,47	8,97	7,04
P ₂ O ₅	0,96	2,44	1,32	2,35	0,21	0,28	0,19	0,10	0,18
П.п.п.	9,97	5,90	5,96	1,72	5,65	5,86	4,90	3,83	2,02
Сумма	99,51	99,60	99,62	99,49	99,44	99,33	99,77	99,52	100,04
CO ₂	7,70	4,84	4,84	0,88	2,86	0,55	3,74	1,54	2,36
S	0,33	0,34	0,34	1,14	0,11	н.о.	н.о.	0,20	0,34
F	0,19	0,10	0,10	0,09	0,63	0,05	0,01	1,40	0,02
ppm									
Li	13,0	2,3	2,6	4,4	9,4	н.о.	1,3	1,9	4,7
Be	4,2	1,9	1,6	1,6	2,4	1,0	4,2	6,0	5,8
Sc	14,7	22,9	12,8	4,5	12,2	42,1	0,78	1,2	1,0
Ti	10788	40846	16425	7277	28675	13853	994	2320	2841
V	325	534	241	241	558	418	112	138	104
Cr	4,0	10,8	1,3	4,7	8,0	62,0	5,3	10,4	5,2
Co	19,3	56,1	35,8	32,8	37,6	51,7	1,9	2,8	3,6
Ni	2,4	28,7	3,8	5,9	15,7	21,1	3,8	4,8	3,8
Cu	49,4	162	100	120	131	22,6	4,9	7,5	2,6
Zn	129	99,7	109	66,7	60,7	146,4	33,5	64,7	52,6
Ga	17,5	23,2	18,4	17,7	27,5	н.о.	25,5	37,3	29,1
Ge	1,2	2,0	1,3	1,3	2,2	н.о.	0,47	0,77	0,62
Rb	112	19,1	9,4	22,1	29,9	42,31	116	157	97,7
Sr	982	348	669	443	321	248	289	354	604
Y	28,5	20,4	34,9	48,5	70,4	33,0	4,2	4,2	10,9
Zr	492	437	757	667	986	125	270	381	546
Nb	622	203	547	38,1	78,9	17,8	188	223	284
Cs	2,6	0,16	0,28	0,33	0,27	5,6	0,88	0,84	0,93
Ba	667	89,78	235	37,3	39,5	486	1509	1631	1097
La	87,7	50,3	222	38,4	16,4	21,7	20,2	12,9	33,0
Ce	201	108	550	67,5	35	50,9	38,3	26,2	72,4
Pr	25,0	11,9	67,1	7,95	4,5	6,8	4,1	2,7	8,3
Nd	97,1	46,7	254	33,7	21,9	30,4	14,6	9,9	31,5
Sm	17,7	8,9	39,4	9,0	7,18	7,4	2,5	1,6	5,2
Eu	4,9	2,8	9,7	3,0	2,9	2,2	0,56	0,72	1,5
Gd	10,1	9,7	16,2	9,4	10,0	1,18	1,17	1,8	4,1
Tb	1,4	1,0	2,2	1,5	1,5	7,5	0,2	0,2	0,6
Dy	8,2	4,7	12,1	8,9	9,2	7,1	1,2	0,77	2,5
Ho	1,29	0,76	1,81	1,7	1,83	1,42	0,21	0,14	0,47
Er	3,1	1,7	3,9	4,8	5,0	3,6	0,56	0,36	1,1
Tm	0,37	0,19	0,41	0,60	0,67	0,53	0,09	0,05	0,17
Yb	2,2	1,1	2,2	3,7	4,2	3,0	0,67	0,45	1,3
Lu	0,31	0,14	0,27	0,49	0,57	0,4	0,13	0,08	0,2
Hf	13,4	12,1	14,2	12,1	13,6	3,5	10,9	4,1	9,0
Ta	26,4	8,7	38,0	1,9	3,0	0,97	10,2	6,45	12,2
Pb	1,4	1,3	2,4	0,01	1,5	3,8	2,6	4,3	6,2
Th	7,0	1,8	21,2	1,2	1,1	2,9	5,0	2,7	11,1
U	1,5	1,6	10,6	0,7	0,8	0,5	10,9	19,4	7,3
Сумма РЗЭ	460	247	1181	191	120	144	84,4	57,8	162
K(Mg)	28,3	35,4	29,3	28,2	30,3	24,1	18,6	29,9	15,4
K(A)	0,7	0,25	0,30	0,63	0,57	0,33	0,84	0,82	0,85

Примечание. Здесь и в табл. 3: н.о. – не определялось.

Note. There and in table 3: н.о. – not determined.

Магнезиальность мельтейгитов ($Mg\# = 28–35$) является наиболее высокой среди силикатных пород комплекса и отражает их наименьшую степень дифференцированности по отношению к другим разновидностям пород комплекса. Кроме того, породы характеризуются наиболее высокими содержаниями титана, кальция и низкими алюминия и щелочей по сравнению с ийолитами и щелочными сиенитами (рис. 4). Содержание ниобия и других редких элементов в мельтейгитах выше, чем в щелочных сиенитах (рис. 5). Суммарные концентрации REE в среднем в пределах 700 ppm. Легкие лантаноиды преобладают над тяжелыми (среднее $La/Yb_{(CN)} = 50$, Gd/Yb – до 7), а европиевая аномалия отсутствует, что проиллюстрировано на графике (рис. 6, а). На графиках со-

держаний редких элементов, нормированных к примитивной мантии, отмечаются отрицательные аномалии Pb и Ti по отношению к соседним элементам и значительные вариации высокочarged элементов (Nb, Ta, Zr, Hf) (рис. 6, b). Ce/Pb – высокие (140–230).

Для ийолитов характерна более высокая общая щелочность пород по сравнению с мельтейгитами, сумма Na_2O и K_2O в отдельных пробах достигает 16 мас. % (см. рис. 3, а, табл. 2). Натрий преобладает над калием со средним $Na_2O/K_2O = 2$. Относительно мельтейгитов прослеживается увеличение значений коэффициента апаитности (Ka) (см. рис. 3, b) и уменьшается содержание таких элементов, как кальций, магний, титан и фосфор (см. рис. 4). Магнезиальность пород $Mg\# = 24–30$ (см. табл. 2).

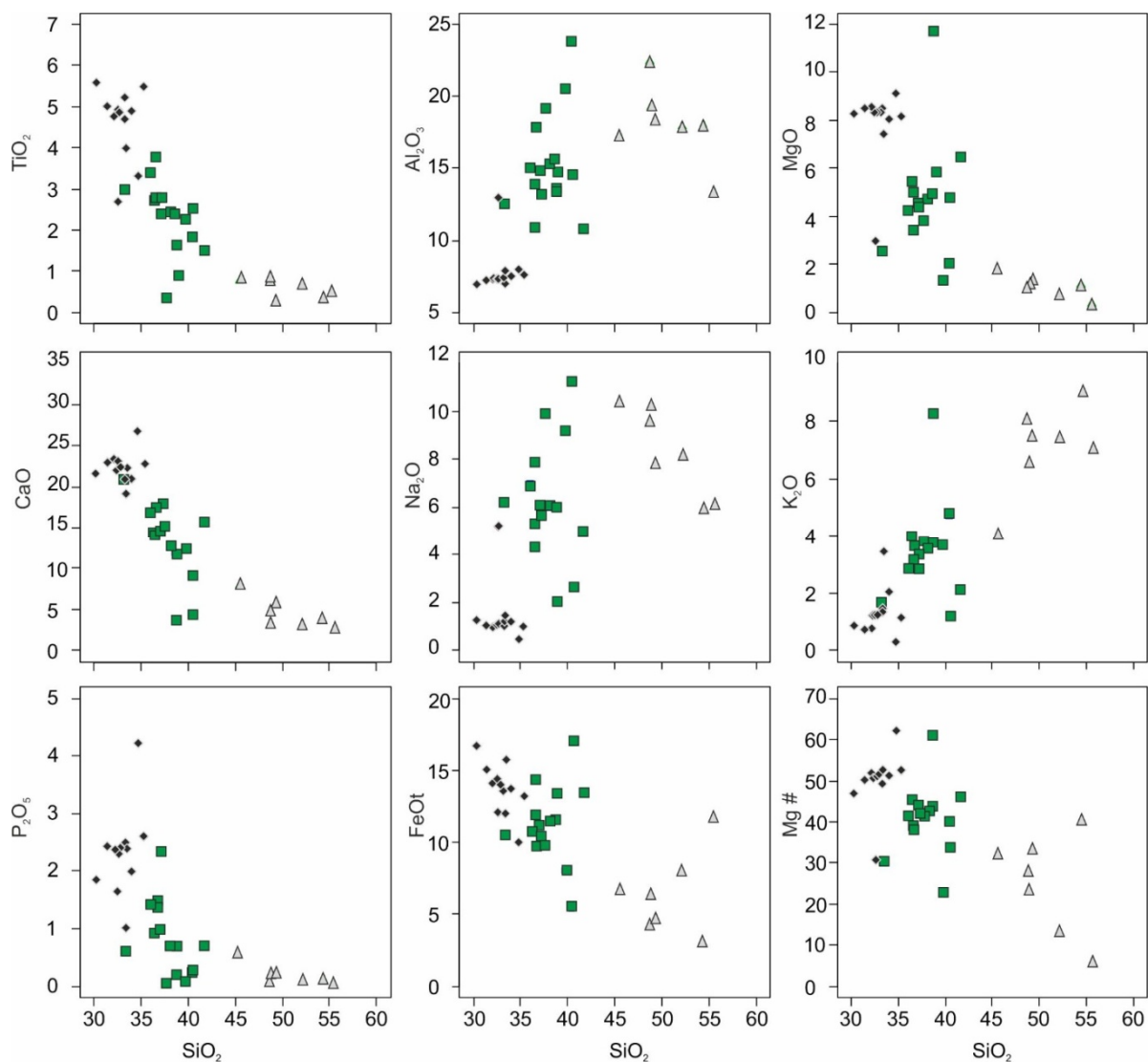


Рис. 4. Соотношение SiO_2 и петрогенных оксидов (мас. %) в ультраосновных породах и щелочных сиенитах Белозиминского месторождения
Условные обозначения приведены на рис. 3

Fig. 4 The ratio of SiO_2 and petrogenic oxides (wt. %) in ultrabasic rocks and alkaline syenites of the Belaya Zima carbonatite complex
The legend is shown in fig. 3

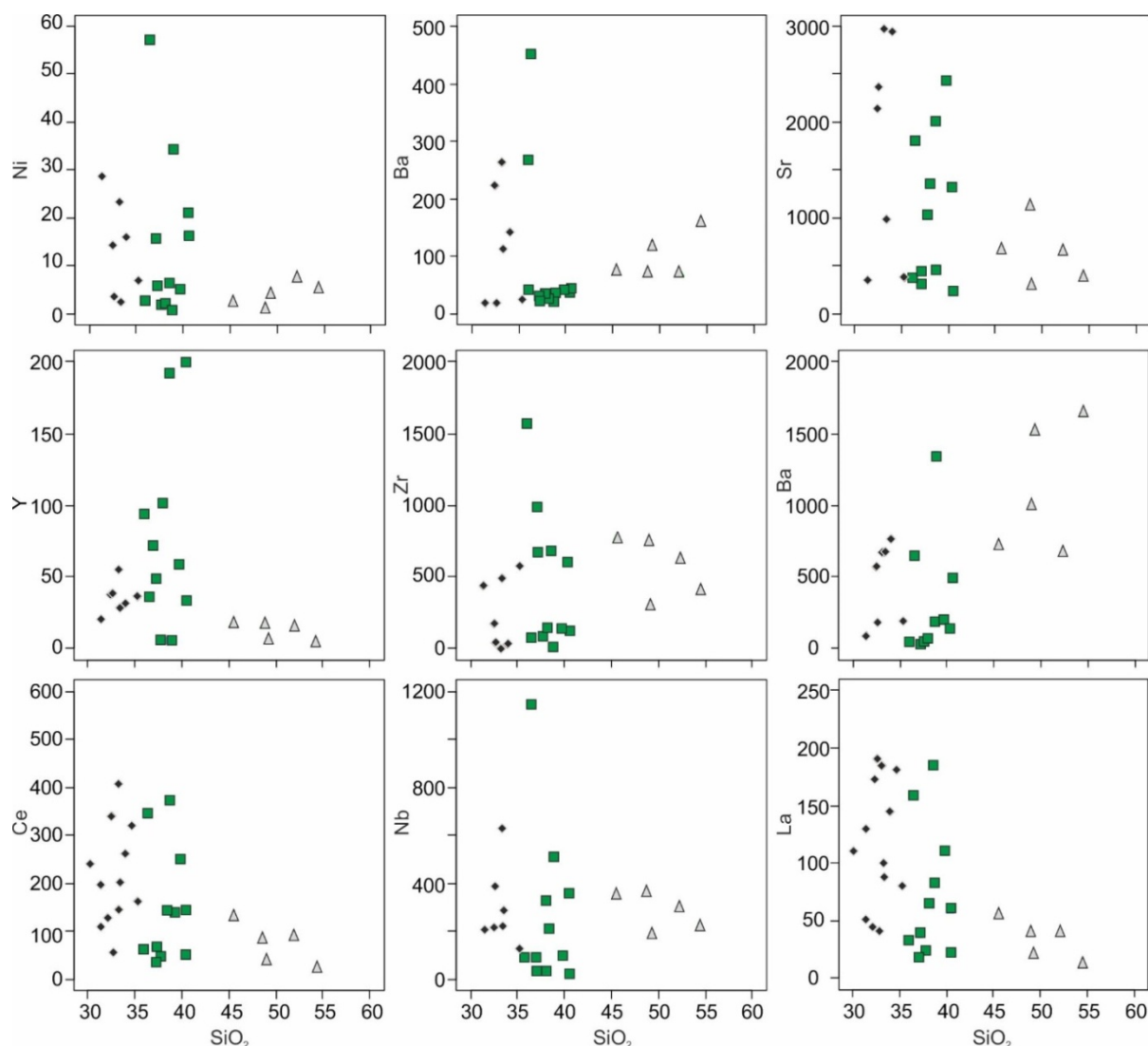


Рис. 5. Вариационные диаграммы для ультраосновных пород и щелочных сиенитов Белозиминского массива (редкие элементы в ppm)
Условные обозначения приведены на рис. 3

Fig. 5. Variational diagrams for ultrabasic rocks and alkaline syenites of the Belaya Zima carbonatite complex (rare elements in ppm)
The legend is shown in fig. 3

Сумма РЗЭ достигает 200 ppm (в среднем – 130 ppm). На графике нормированных к хондриту содержаний РЗЭ в ийолитах наблюдается несколько отличное от мельтейгитов поведение (см. рис. 6, *a*). Это выражено в почти равном соотношении легких и тяжелых РЗЭ (среднее $\text{La/Yb}_{(\text{CN})} = 5$, Gd/Yb – до 5). Вариации и уровень концентраций редких элементов в ийолитах схож с таковым в мельтейгитах (см. табл. 2, рис. 5, 6). На графиках нормированных к примитивной мантии содержаний редких элементов наблюдаются отрицательные аномалии Pb и Ti. Значения Ce/Pb высокие, как в мельтейгитах (до 88).

Щелочные сиениты характеризуются низкой магниальностью ($\text{Mg\#} = 15\text{--}29$), наименьшим количеством кальция, фосфора и титана и наибольшим

калия, бария и рубидия по сравнению с мельтейгитами и ийолитами (см. рис. 4, 5). Содержание суммы Na_2O и K_2O варьирует от 11 до 16 мас. % (см. рис. 3, *a*) при практически равном соотношении элементов, в среднем 1. Коэффициент агпаитности (до 0,85) наиболее высокий из всех разновидностей щелочных силикатных пород (см. рис. 3, *b*). Щелочные сиениты характеризуются более низкой суммой РЗЭ (в среднем 100 ppm) по сравнению с другими разновидностями щелочных силикатных пород комплекса. Конфигурация графиков содержаний РЗЭ, нормированных к хондриту, для нефелиновых сиенитов несколько отличается от таковой для мельтейгитов и ийолитов. Это выражено в преобладании легких РЗЭ над тяжелыми ($\text{La/Yb}_{(\text{CN})} = 25\text{--}120$, Gd/Yb – до 2,5) и

незначительном прогибе в области средних лантаноидов (см. рис. 6, *a*). Аномалия европия отсутству-

ет. Щелочные сиениты относительно мельтейгитов и ийолитов обогащены Rb, Ba, обеднены Sr, Ta, Hf, Ni.

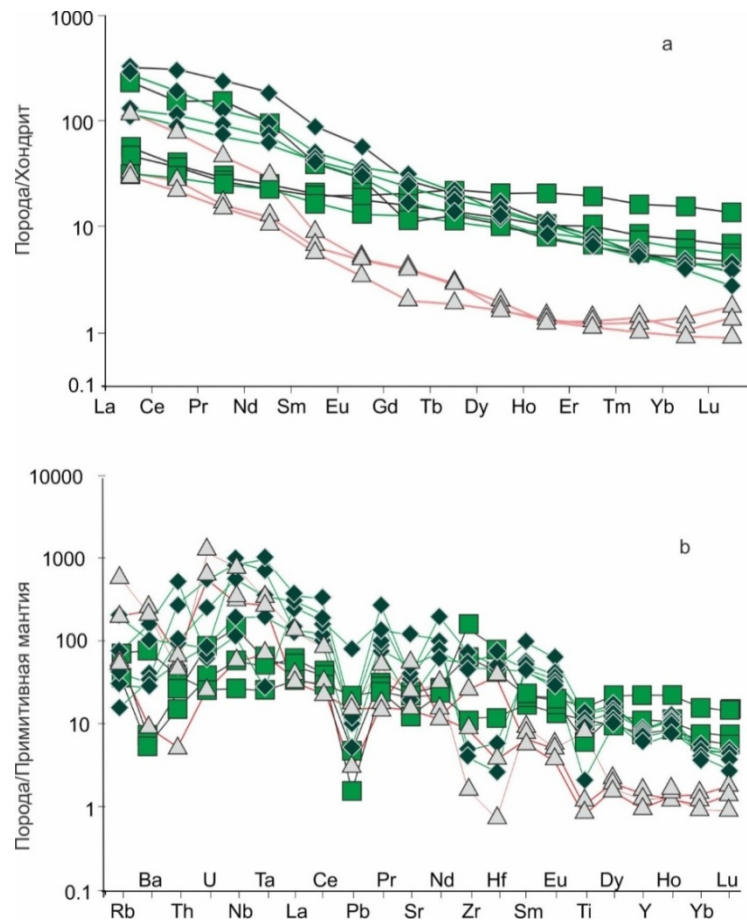


Рис. 6. Содержание РЗЭ (а) и редких (б) элементов в щелочных породах Белозиминского массива

Данные по хондриту из [McDonough, Sun, 1995], по примитивной мантии из [Sun, McDonough, 1989].
Условные обозначения приведены на рис. 2

Fig. 6. Chondrite-normalized REE (a) and rare (b) plots in alkaline rocks of the Belaya Zima carbonatite complex

Chondrit data from [McDonough, Sun 1995]. primitive mantle data from [Sun, McDonough, 1989].
The legend is shown in fig. 2

Согласно классификационной диаграмме [Woolley, Kempe, 1989], кальцитовые карбонатиты относятся к кальциокарбонатитам, кальцит-доломитовые карбонатиты по своему составу варьируют от кальциокарбонатитов до феррокарбонатитов, а фигуративные точки анкеритовых карбонатитов ложатся в поле магнезиокарбонатитов и феррокарбонатитов (рис. 7). Анализы содержаний основных петрогенных и редких элементов карбонатитов представлены в табл. 3.

Карбонатиты характеризуются более высокой концентрацией РЗЭ (1 200–52 000 ppm) по сравнению с щелочными силикатными породами. В спектре редкоземельных элементов не наблюдается европиевой аномалии. Легкие лантаноиды преобладают над тяжелыми. La/Yb отношение в среднем: 20–25 (кальцитовые), 25–50 (кальцит-доломитовые), 50–200 (ан-

керитовые карбонатиты) (рис. 8, *a*). Максимальное содержание РЗЭ отмечено в анкеритовых карбонатитах, где РЗЭ концентрируются в синхизите-Се, бастнезите-Се и монаците-Се. В кальцитовых и кальцит-доломитовых карбонатитах РЗЭ концентрируются в пирохлоре, аксессуарных анкилите и бербанките, в апатите, цирконолите, кальците, в меньшей степени, в клинопироксене [Doroshkevich et al., 2017].

Как видно из диаграммы нормированных к примитивной мантии содержаний редких элементов из карбонатитов Белозиминского массива (рис. 8, *b*), концентрации Nb, Ta, Zr, Hf в разных типах породах различны. Высокие содержания Nb–Ta и Zr–Hf отмечены в кальцитовых и кальцит-доломитовых карбонатитах по сравнению с анкеритовыми разновидностями.

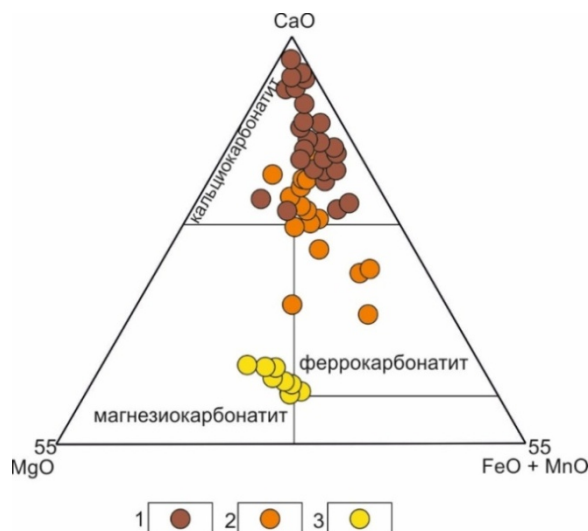


Рис. 7. Классификация и номенклатура карбонатитов [Woolley, Kempe, 1989]

1 – кальцитовые карбонатиты; 2 – кальцит-доломитовые карбонатиты;
3 – анкеритовые карбонатиты Белозиминского массива

Fig. 7. Classification and nomenclature of carbonatites [Woolley, Kempe, 1989]

1 – Calcite carbonatites; 2 – Calcite-dolomite carbonatites;
3 – ankerite carbonatites of the Belaya Zima carbonatite complex

Таблица 3

Представительные анализы химических составов карбонатитов Белозиминского массива

Table 3

Representative analyzes of the chemical composition of the carbonatites of the Belaya Zima complex

Номер про- бы, мас. %	Кальцитовые			Кальцит-доломитовые					Анкеритовые		
	C411/25-34	2555	2050-119-121	2099-75-80	C-257	2096-257	2350	2098-679-675	2099-297-305	2099-1a	2098
SiO ₂	2,90	1,16	0,80	10,50	5,20	11,20	4,96	1,12	0,20	0,33	0,50
TiO ₂	0,06	0,21	0,02	0,29	0,45	0,85	0,46	0,02	0,02	0,02	0,02
Al ₂ O ₃	0,30	0,10	0,10	3,40	1,20	1,80	0,30	0,10	0,10	0,09	0,10
Fe ₂ O ₃	1,41	4,31	0,14	0,85	1,19	3,21	9,88	0,26	0,90	0,58	0,34
FeO	1,97	2,46	0,92	2,28	2,28	3,62	6,32	7,08	10,16	8,94	8,84
MnO	0,62	0,33	0,57	0,24	0,26	0,28	0,74	1,69	2,41	2,18	2,23
MgO	2,72	1,83	2,37	7,46	2,29	3,44	6,24	15,15	12,48	11,93	12,88
CaO	48,54	49,40	51,58	39,22	48,52	42,73	37,34	30,26	27,33	25,80	27,49
Na ₂ O	0,04	0,35	0,12	0,31	0,28	0,41	0,23	0,07	0,07	0,06	0,06
K ₂ O	0,38	0,08	0,12	2,80	0,60	0,86	0,25	0,01	0,01	0,01	0,01
P ₂ O ₅	1,47	4,30	1,90	1,10	2,20	3,00	6,00	3,10	1,90	2,73	3,90
п.п.п.	37,76	32,45	40,42	30,87	35,18	28,17	24,62	40,83	39,10	38,47	38,40
Сумма	98,17	96,98	99,04	99,32	99,65	99,57	97,34	99,67	94,66	91,15	94,75
CO ₂	37,62	32,01	40,15	28,16	34,43	27,72	23,76	40,04	39,82	36,60	37,95
S	н.о.	0,16	н.о.	н.о.	0,38	0,23	н.о.	0,21	0,62	н.о.	н.о.
F	0,2	0,45	0,22	0,39	0,29	0,31	0,39	0,34	0,08	н.о.	0,14
ppm											
Be	0,13	0,27	0,32	3,6	0,77	1,8	0,27	0,69	0,95	0,78	0,42
Sc	1,4	2,6	4,9	5,5	0,85	2,8	6,7	7,6	10,2	8,5	8,3
Ti	191	1001	135	2257	3235	4422	1579	88,61	125	91,1	120
V	21,5	82,0	9,5	37,9	104	154	174	37,6	22,7	23,4	25,8
Cr	1,1	0,8	2,1	1,2	1,7	1,4	1,1	13,8	3,0	2,2	17,8
Co	3,3	4,0	4,7	6,3	9,6	16,2	8,0	6,4	8,2	6,8	5,0
Ni	5,1	10,3	15,2	8,3	11,5	10,9	7,2	10,4	6,7	5,0	7,0
Cu	2,4	1,7	4,9	7,5	8,6	18,7	5,2	2,0	4,2	3,5	2,9
Zn	8,9	39,9	13,7	54,0	46,1	77,0	120	71,8	122	101	57,4
Rb	21,1	2,5	5,9	126,7	49,9	44,3	26,7	0,96	1,4	0,83	1,5
Sr	2682	7082	8677	6236	6424	5370	5226	7298	4135	3800	3394
Y	35,3	80,8	74,9	80,4	71,4	70,3	80,9	31,5	39,5	31,1	29,7
Zr	10,7	751	37,0	2083,4	59,6	231,0	370,3	8,9	14,7	23,2	2,6
Nb	242	15660	2502	5865	252	111	5429	1237	60,1	52,1	96,3
Ba	335	359	718	1924	790	551	344	73,76	197	177	107
La	158	374	265	204	245	255	365	594	14504	9969	14127
Ce	306	1535	595	535	523	558	1069	1194	27674	19200	22248

Окончание табл. 3

Номер пробы, мас. %	Кальцитовые			Кальцит-доломитовые					Анкеритовые		
	C411/25-34	2555	2050-119-121	2099-75-80	C-257	2096-257	2350	2098-679-675	2099-297-305	2099-1a	2098
Pr	34	110	57	58	52	58	93	107	2603	1667	1811
Nd	116	380	198	226	192	220	335	354	6002	4753	5219
Sm	17,5	65,9	33,7	45,4	33,9	40,5	60,1	50,0	381	308	388
Eu	4,9	17,9	10,2	13,7	10,4	12,0	16,4	12,1	63,8	52,6	70,0
Gd	6,8	35,7	25,7	33,6	26,9	31,8	41,3	30,2	160	125	165
Tb	1,2	5,5	3,6	4,7	3,6	4,1	5,3	3,4	19,5	15,4	18,9
Dy	7,3	23,5	17,2	23,0	17,1	18,1	23,1	10,4	60,0	15,9	21,7
Ho	1,3	3,7	3,1	4,0	3,0	3,0	3,7	1,4	2,6	1,9	2,2
Er	3,3	8,1	8,0	9,4	7,4	6,9	8,1	2,9	5,1	3,9	3,6
Tm	0,44	1,0	1,1	1,2	0,95	0,83	0,99	0,37	0,51	0,43	0,39
Yb	2,8	5,7	7,1	7,1	5,5	4,6	5,5	2,3	3,1	2,6	2,3
Lu	0,37	0,72	1,0	0,97	0,77	0,61	0,71	0,30	0,40	0,37	0,32
Hf	0,15	7,1	0,76	14,0	0,59	2,0	5,1	0,24	0,56	0,70	0,27
Ta	8,0	8,2	2,61	327,36	6,3	2,9	61,9	6,8	0,42	0,17	0,33
Pb	2,5	14,5	11,6	17,1	18,0	4,5	18,7	5,8	20,2	15,2	18,0
Th	1,4	134	42,42	211	12,2	20,9	251	17,2	213	114	86,3
U	32,39	1,5	0,71	186	1,8	4,5	2,3	4,9	0,33	0,28	0,43
Сумма РЗЭ	659	2567	1225	1166	1121	1213	2027	2363	51478	36115	44077

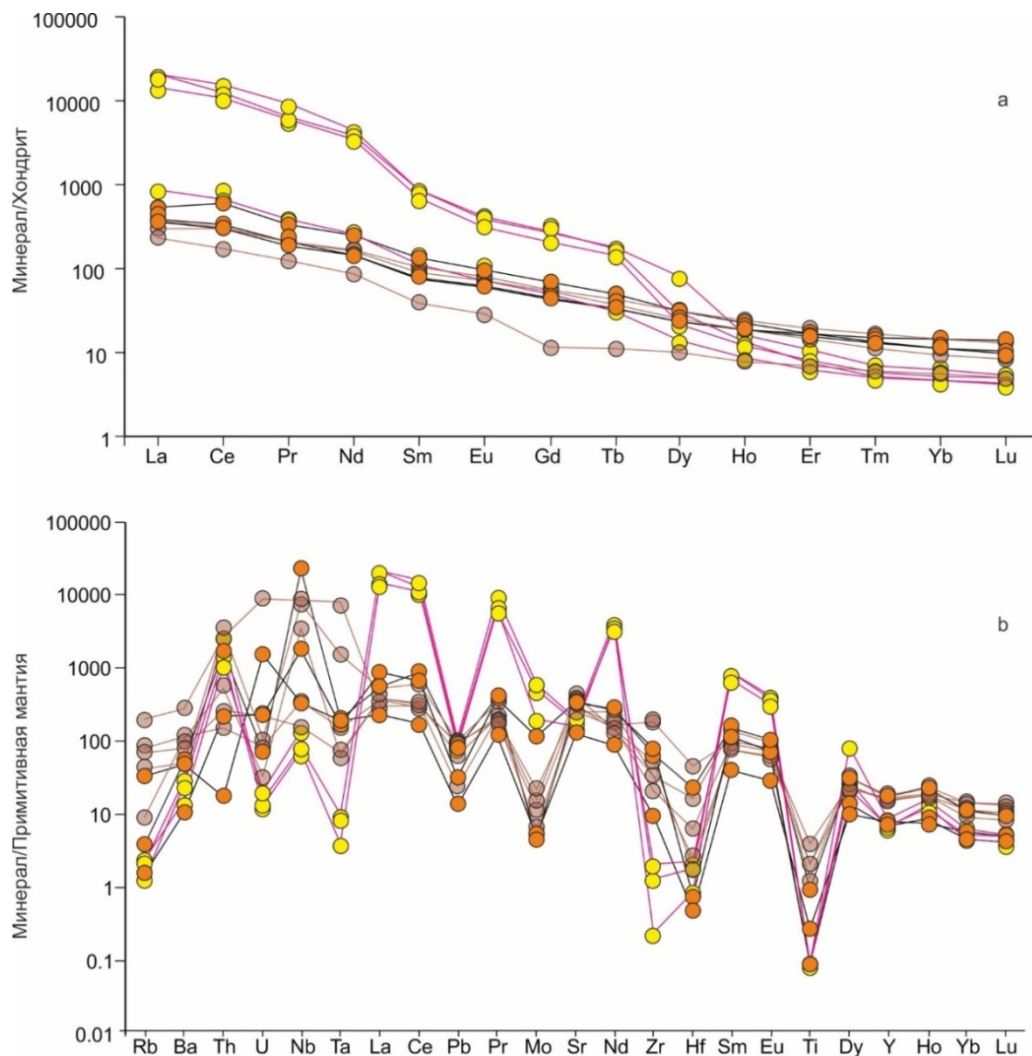


Рис. 8. Содержание РЗЭ (а) и редких (б) элементов в карбонатах Белозиминского массива
Данные по хондриту из [McDonough, Sun, 1995], по примитивной мантии из [Sun, McDonough, 1989].

Условные обозначения приведены на рис. 7

Fig. 8. Chondrite-normalized REE (a) and rare (b) plots in carbonatites of the Belaya Zima carbonatite complex
Chondritis data from [McDonough, Sun 1995]. primitive mantle data from [Sun, McDonough, 1989].
The legend is shown in fig. 7

Радиоогенные (Sr, Nd, Pb) изотопы

В большинстве разновидностей пород первичные $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отношения колеблются в достаточно узком интервале 0,702672–0,703125 (табл. 4, рис. 9). Отличным значением первичного изотопного состава стронция от приведенного диапазона обладает один образец нефелинового сиенита (обр. 2095/325), при этом что он не характеризуется самым высоким от-

ношением $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ в валовом составе и не подвержен интенсивными вторичными изменениями.

Первичные $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ отношения в породах варьируют в более широком интервале (см. табл. 4, рис. 9). Точка верхнего предела диапазона значений $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (I) соответствует мельтейгиту (обр. 0/150), а нижнего – нефелиновому сиениту (обр. 2095/325); последний характеризуется наиболее радиоогенным составом стронция.

Таблица 4

Результаты исследования Rb–Sr, Sm–Nd изотопных систем для пород Белозиминского массива

Table 4

The results of research of Rb–Sr, Sm–Nd isotopic systems for rocks of the of the Belaya Zima complex

Номер образца	Порода	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$	T_{DM}	Rb	Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	I (Sr)	$\epsilon_{\text{Sr}}(\text{T})$
01-151	Мельтейгит	39,47	260	0,0918	$0,51245 \pm 3$	4,97	877	9,49	754	0,0364	$0,703234 \pm 3$	0,7029	–12,1
2092-761-763	Ийолит	9,46	35,39	0,1616	$0,512672 \pm 2$	3,56	1401	18,1	462	0,1133	$0,704101 \pm 3$	0,70306	–9,8
2050-119-121	Кальцитовый карбонатит	26,52	173	0,0928	$0,512432 \pm 2$	4,53	907	6,5	6757	0,0028	$0,702975 \pm 3$	0,70295	–11,4
2099-75-80	Кальцит-доломитовый карбонатит	24,94	141	0,1067	$0,512492 \pm 4$	4,56	939	134,7	4470	0,0872	$0,703731 \pm 3$	0,70293	–11,7
2098	Анкеритовый карбонатит	406	5108	0,0481	$0,512242 \pm 4$	4,5	837	0,78	2499	0,0009	$0,703133 \pm 3$	0,70312	–8,9
2099-287-305	Анкеритовый карбонатит	36,11	548	0,0398	$0,512225 \pm 3$	4,85	813	0,29	3234	0,0003	$0,702933 \pm 4$	0,70293	–11,7
2095-325	Нефелиновый сиенит	11,41	80,91	0,0852	$0,512329 \pm 2$	3,14	976	46,12	699	0,1908	$0,705962 \pm 3$	0,70421	6,5
C-1/135-144	Нефелиновый сиенит	2,92	18,65	0,0946	$0,512407 \pm 2$	3,9	953	143,2	499	0,8306	$0,710291 \pm 3$	0,70267	–15,3

Примечание. Начальные отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ рассчитаны на 643 млн лет.

Note. The initial ratios of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ are estimated at 643 Ma.

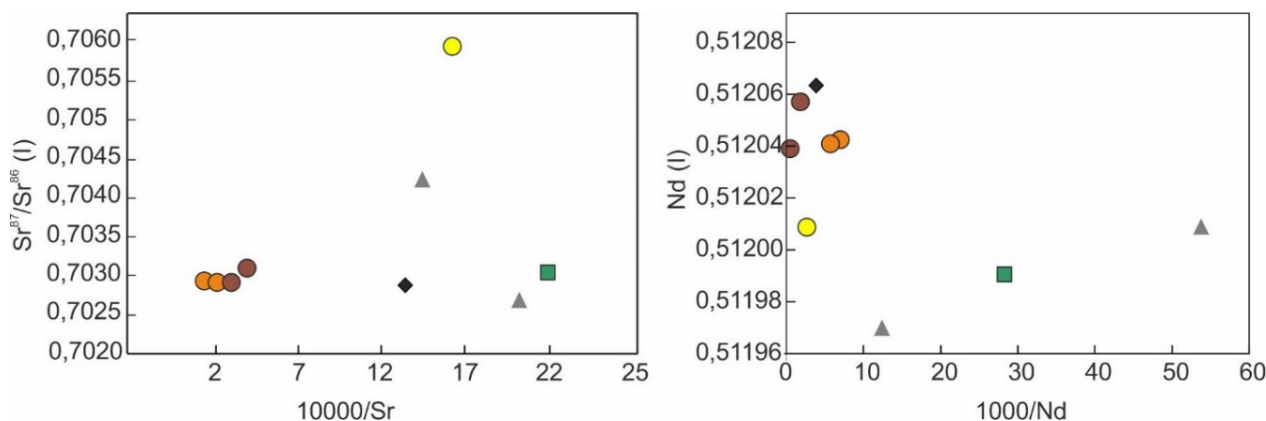


Рис. 9. Вариации $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (I) vs. 10000/Sr (a) и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (I) vs. 1000/Nd (b) в породах комплекса Бelaya Зима
Условные обозначения приведены на рис. 3, 7

Fig. 9. Variations of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (I) vs. 10000/Sr (a) and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (I) vs. 1000/Nd (b) in the rocks of the Belaya Zima carbonatite complex

The legend is shown in fig. 3, 7

Значения $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ варьируют с T (DM) модельным возрастом от 600 до 500 млн лет. Корреляция между значениями $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ и первичными $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ изотопными отношениями в породах комплекса

(рис. 10) указывает на общий умеренно деплетированный мантийный источник. Одновозрастные породы щелочных карбонатитовых массивов, расположенные по краю Сибирского кратона (Ал-

дан-Становой щит, Енисейский кряж, Восточный Саян) характеризуются Sr–Nd изотопными значениями схожими с таковыми для пород Белой Зимы (см. рис. 10).

Измеренные $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в породах комплекса показывают значительные вариации, в части проб обладая аномальными значениями (рис. 11, табл. 5). Наиболее радиогенные составы

определены в кальцит-доломитовом карбонатите, обогащенном пироксеном и апатитом, и связаны с высокими концентрациями Th и U. На диаграмме (см. рис. 11) в координатах $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ все значения проанализированных образцов образуют единую линию и могут быть использованы для построения общей изохроны. Полученная изохрона отвечает возрасту 631 ± 11 млн лет.

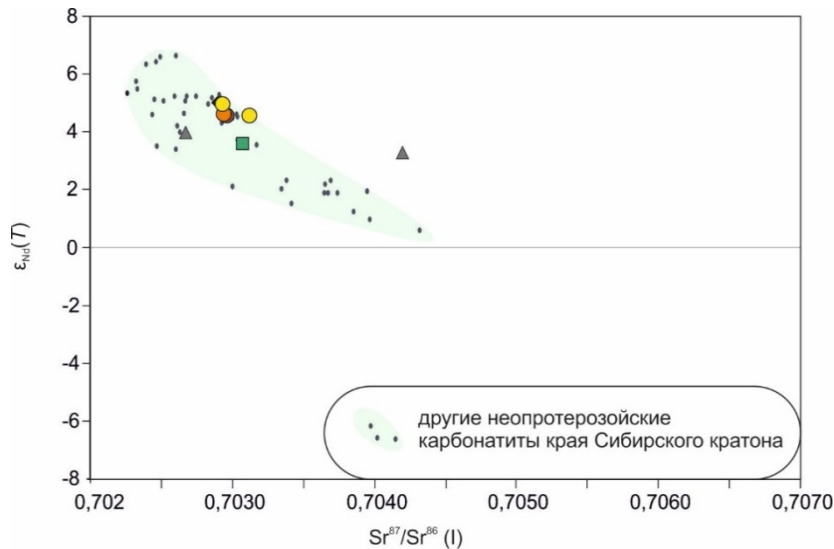


Рис. 10. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ значения для пород Белозиминского массива

На диаграмме для сравнения нанесены значения для неопротерозойских щелочных карбонатитовых комплексов, расположенных по краю Сибирского кратона [Morikiyo et al., 2000; Vladykin et al., 2005; Никифоров, Лыхин 2007, 2008; Врублевский и др. 2011; Doroshkevich et al., 2006, 2007]

Условные обозначения приведены на рис. 3, 7

Fig. 10. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ data for rocks of the Belaya Zima carbonatite complex

The comparison diagram shows the data for the Neoproterozoic alkaline carbonatite complexes located along the edge of the Siberian craton [Morikiyo et al., 2000; Vladykin et al., 2005; Nikiforov, Lykhin 2007, 2008; Vrublevsky et al., 2011; Doroshkevich et al., 2006, 2007]

The legend is shown in fig. 3, 7

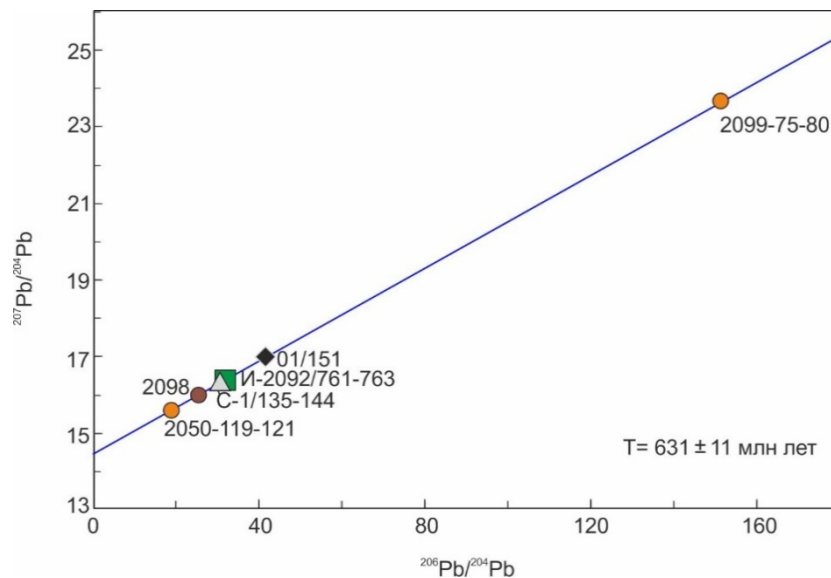


Рис. 11. Диаграмма в координатах $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ для пород Белозиминского массива

Условные обозначения приведены на рис. 3, 7

Fig. 11. The $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ coordinates diagram for rocks of the Belaya Zima carbonatite complex

The legend is shown in fig. 3, 7

Таблица 5

Результаты исследования Pb–Pb изотопных систем для пород Белозиминского массива

Table 5

The results of the study of Pb–Pb isotope systems for rocks of the Belaya Zima complex

Номер образца	Порода	m, мг	I ^{206}Pb mV	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2 sigma	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2 sigma	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2 sigma
01-151	Мельтейгит	0,18	10711	41,4716	0,0009	16,9759	0,0004	54,4899	0,0014
2092-761-763	Ййолит	0,18	2984	30,0934	0,0013	16,2799	0,0008	45,5747	0,0024
2099-75-80	Кальцит-доломитовый карбонатит	0,26	3363	151,2387	0,0028	23,6372	0,0004	81,0165	0,0016
C-1/135-144	Нефелиновый сиенит	0,21	6738	32,0893	0,0007	16,3845	0,0005	41,0004	0,0013
2050-119-121	Кальцитовый карбонатит	0,19	4280	18,7349	0,0004	15,5977	0,0004	47,3074	0,0013
2098	Анкеритовый карбонатит	0,26	5424	25,3672	0,0006	15,9718	0,0005	42,3962	0,0015

Примечание. Поправка на содержание холостого свинца не вводилась.

Note. No lead correction was entered.

Дискуссия

Возраст

Возраст 631 ± 11 млн лет, полученный по Pb/Pb изохроне для пород Белозиминского массива, можно интерпретировать как период его становления. Этот результат перекрывается с предыдущими возраст-

ными оценками (643 ± 3 млн лет [Ярмолук и др., 2005] и 645 ± 6 млн лет [Doroshkevich et al., 2016; Salnikova et al., 2019]) для пород массива (рис. 12). Время формирования интрузии ложится в интервал 700–600 млн лет значений образования щелочных карбонатитовых массивов, распложенных по краю Сибирского кратона (Алдан-Становой щит, Енисейский кряж, Восточный Саян) (рис. 12).

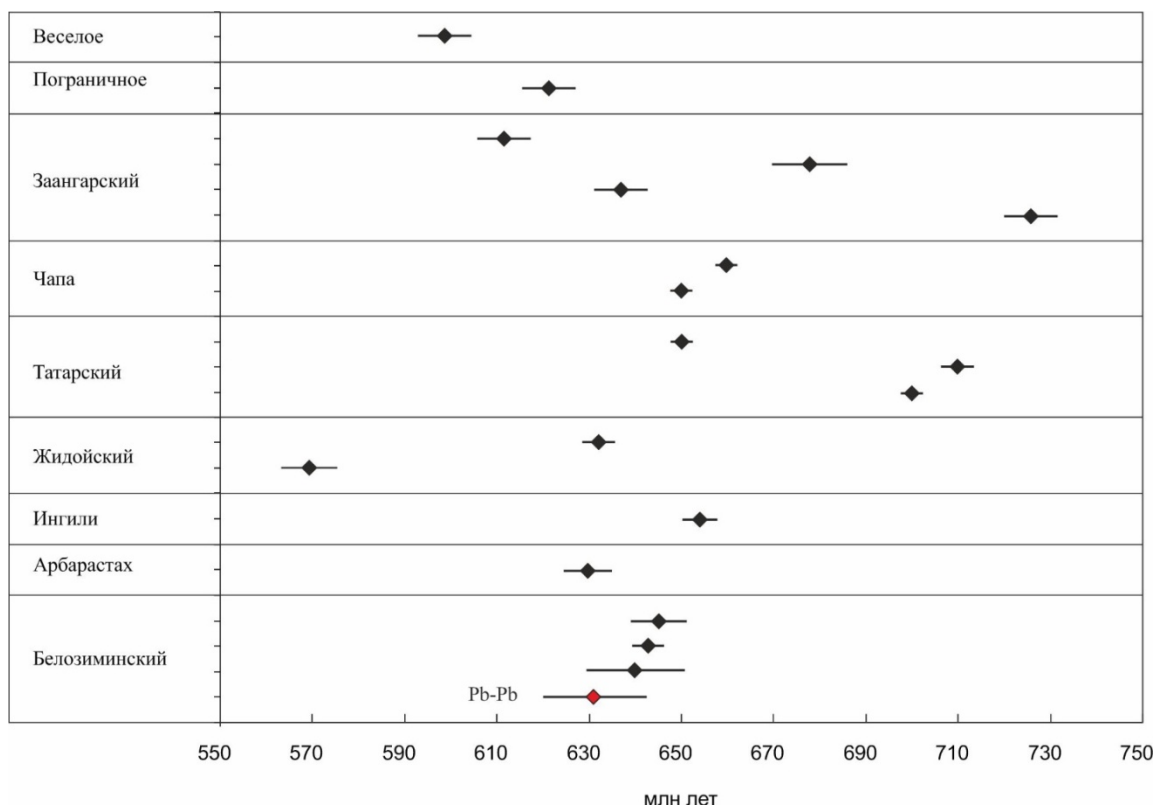


Рис. 12. Гистограмма возрастов для щелочных карбонатитовых массивов, распложенных по краю Сибирского кратона (Алдан-Становой щит, Енисейский кряж, Восточный Саян)

Составлена с использованием данных: [Собаченко и др., 1986; Ярмолук и др., 2005; Рассказов и др., 2007; Верникова и др., 2007; Рипп и др., 2009; Врублевский и др., 2011; Государственная..., 2016; Morikiyo et al., 2000; Doroshkevich et al., 2016; Salnikova et al., 2019]

Fig. 12. The age's histogram of alkaline carbonatite massifs located along the edge of the Siberian Craton (Aldan-Stanovoi Shield, Yenisei Ridge, East Sayan)

Compiled using data from [Sobachenko et al., 1986; Yarmolyuk et al., 2005; Rasskazov et al., 2007; Vernikovskaya et al., 2007; Ripp et al., 2009; Vrublevsky et al., 2011; Gosudarstvennaya..., 2016; Morikiyo et al., 2000; Doroshkevich et al., 2016; Salnikova et al., 2019]

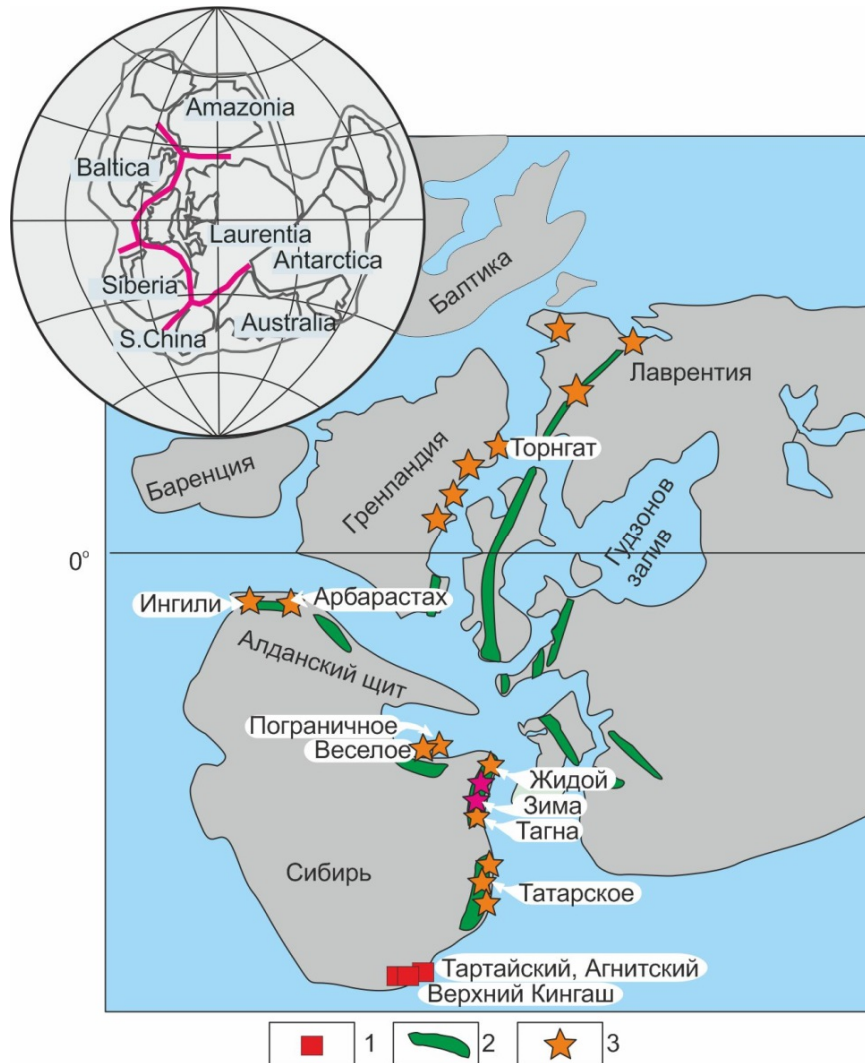


Рис. 13. Распад Родинии (~ 700–600 млн лет) и ассоциирующие с расколом проявления щелочного и ультраосновного-основного магматизма [Ярмолук и др., 2005]

1 – магматические проявления (ультрамафит-мафитовые массивы, 712–720 млн лет); 2 – грабены и дайковые пояса; 3 – щелочные комплексы с карбонатитами (540–680 млн лет)

Fig. 13. The decay of Rodinia (~ 700–600 Ma) and the manifestations of alkaline and ultrabasic-basic magmatism associated with destruction [Yarmolyuk et al., 2005]

1 – ultramafic-mafic plutons (712–720 Ma); 2 – grabens and dyke belts; 3 – alkaline complexes with carbonatites (540–680 Ma)

Согласно представлениям ряда исследователей [Ярмолук, Коваленко, 2001; Ярмолук и др., 2005; Ножкин и др., 2008], развитие неопротерозойского щелочного магматизма на окраине Сибирского кратона было связано с деятельностью суперплюма, вызвавшего распад лавразийской части Родинии и раскрытие Палеоазиатского океана (рис. 13). Наряду с щелочным магматизмом в качестве индикаторов распада рассматриваются дайковые пояса Саяно-Байкальского региона (780–740 млн лет) [Sklyarov et al., 2003; Гладкочуб и др., 2007], бимодальный магматизм и гранитообразование Енисейского кряжа и Олоkitской зоны Байкальской складчатой области (700–727 млн лет) [Рыцк и др., 2002; Ножкин и др., 2008].

Источники вещества

Полученные Sr–Nd изотопные данные для пород массива Белая Зима показывают, что их источники отвечают относительно неоднородному резервуару с умеренно деплетированными изотопными характеристиками. Наблюдаемые вариации изотопного состава Sr и Nd пород могут быть связаны с коровой контаминацией расплавов или неоднородностью их источника. Вариант коровой контаминации выглядит маловероятным. С одной стороны, высокие концентрации стронция и РЗЭ в породах массива по сравнению с вмещающими породами [Рассказов, 2007] не предполагают возможности проявления изотопной гетерогенности. С другой стороны, совместимость изотопных данных

Pb с изохроной указывает на то, что взаимодействие между первичными магмами и корой во время внедрения не привело к сколько-нибудь значительному изменению изотопного состава Pb между различными интрузивными фазами массива. Подтверждением этого также являются отрицательная аномалия свинца на графиках редких элементов пород, нормированных к хондриту, высокие Ce/Pb отношения, а также опубликованные данные по изотопному составу кислорода [Doroshkevich et al., 2016].

Вариант изначальной изотопной гетерогенности источника пород Белой Зимы представляется приемлемым и вполне согласуется с распространенной точкой зрения, согласно которой непосредственно перед плавлением деплетированный мантийный субстрат подвергался активной метасоматической проработке и привносу вещества, обогащенного летучими компонентами и редкими элементами [Когарко и др., 1999; Андреева и др., 2007].

Высокое содержание несовместимых элементов в породах Белозиминского массива (Sr и Nb, La/Sm отношение), присутствие карбонатитов свидетельствуют о пользе того, что вероятный мантийный метасоматический агент имел карбонатный исходный состав. Андреева с соавт. [Андреева и др., 2007] на основании изучения стекол расплавных включений в минералах из ийолитов Белой Зимы пришли к выводу о карбонатном составе метасоматического мантийного компонента.

Высокое Gd/Yb отношение в породах указывает на то, что первичные расплавы были сформированы из гранат-содержащего источника при низкой степени частичного плавления. Низкие содержания Rb, K и Pb по сравнению с HFSE и LREE позволяют полагать, что в первичных расплавах элементы буферировались флогопитом в процессе плавления.

Стоит отметить, что породы неопротерозойских щелочных карбонатитовых массивов, расположенные по краю Сибирского кратона (Алдано-Становой щит, Енисейский кряж, Восточный Саян), характеризуются схожими с породами Белой Зимы Sr–Nd изотопными значениями [Morikiyo et al., 2000; Владыкин, 2005; Doroshkevich et al., 2006, 2007; Никифоров, Лыхин 2007, 2008; Врублевский и др., 2011, 2012]. Это позволяет предполагать, что первичные магмы для пород вышеперечисленных комплексов были сформированы из единого умеренно деплетированного мантийного источника, расположенного под Сибирским кратоном. Ряд исследователей связывают образование массивов щелочных пород с деятельностью суперплюма [Ярмолук и др., 2005; Ножкин и др., 2008]. Эту точку зрения трудно аргументировать в данной работе, учитывая локальное размещение комплексов. Тем не менее можно предполагать, что карбонатный (или карбонатно-силикатный) метасоматический агент высвобождался из рециклированной океанической коры головки

плюма, взаимодействуя с литосферным мантийным материалом (гарцбургитом). Это предположение согласуется с исследованием изотопного состава кислорода в минералах Белой Зимы [Doroshkevich et al., 2016], которое показало, что первичные расплавы характеризовались низкими $\delta^{18}\text{O}$ и могли быть связаны с метасоматическими агентами, выделяющимися из субдуцированной гидротермально-измененной коры с низким $\delta^{18}\text{O}$.

Соболев с соавт. [Соболев и др., 2009] предложили схожую модель формирования первичных магм для триасовых меймечитов и щелочных пород провинции Маймеча-Коту, которые рассматриваются как продукты деятельности Сибирского мантийного суперплюма.

Эволюция расплавов

Имеющиеся на сегодняшний день многочисленные петрологические и экспериментальные данные (см., напр.: [Le Bas, 1987; Veksler et al., 1998; Арзамасцев, Арзамасцева, 2013 и др.]) свидетельствуют, что кристаллизационная дифференциация первичной оливин-меланефелинитовой магмы является главным процессом, ответственным за образование щелочно-ультраосновных – основных серий в щелочных карбонатитовых комплексах мира. Андреева с соавт. [Андреева и др., 2004, 2007] на основании изучения расплавных включений в минералах щелочных ультраосновных пород Белой Зимы оценили состав родоначальных расплавов и пришли к выводу, что они соответствуют недосыщенным кремнекислотой высококальциевым расплавам (меланефелинитового (?) состава), обогащенным щелочами, редкими и летучими компонентами.

Магнезиальность мельтейгитов Белой Зимы, свидетельствующая в пользу наименьшей степени дифференцированности по отношению к другим разновидностям пород комплекса, тем не менее, наряду с низкими концентрациями никеля и хрома пород, подтверждает факт завершившейся кристаллизации оливина. Согласно исследованиям плавкости системы нефелин–диопсид–титанит [Veksler, Tepteleev, 1990], после кристаллизации оливина меланефелинитовый расплав будет эволюционировать в сторону диопсид-перовскитовой котектики. Ранняя кристаллизация перовскита в мельтейгитах Белой Зимы привела к обеднению остаточного расплава P3Э и Nb и кристаллизации P3Э-деплетированных ийолитов и нефелиновых сиенитов. Апатит также может быть важной фазой в контроле P3Э, поскольку его количество в мельтейгитах достигает 3%, а имеющиеся экспериментальные данные по коэффициентам распределения P3Э между минералом и силикатным расплавом выше единицы [Prowatke, Klemme, 2006; Watson, Green, 1981]. Рассмотренные особенности кристаллизации расплавов Белой Зимы схематически изображены на рис. 14, а, б.

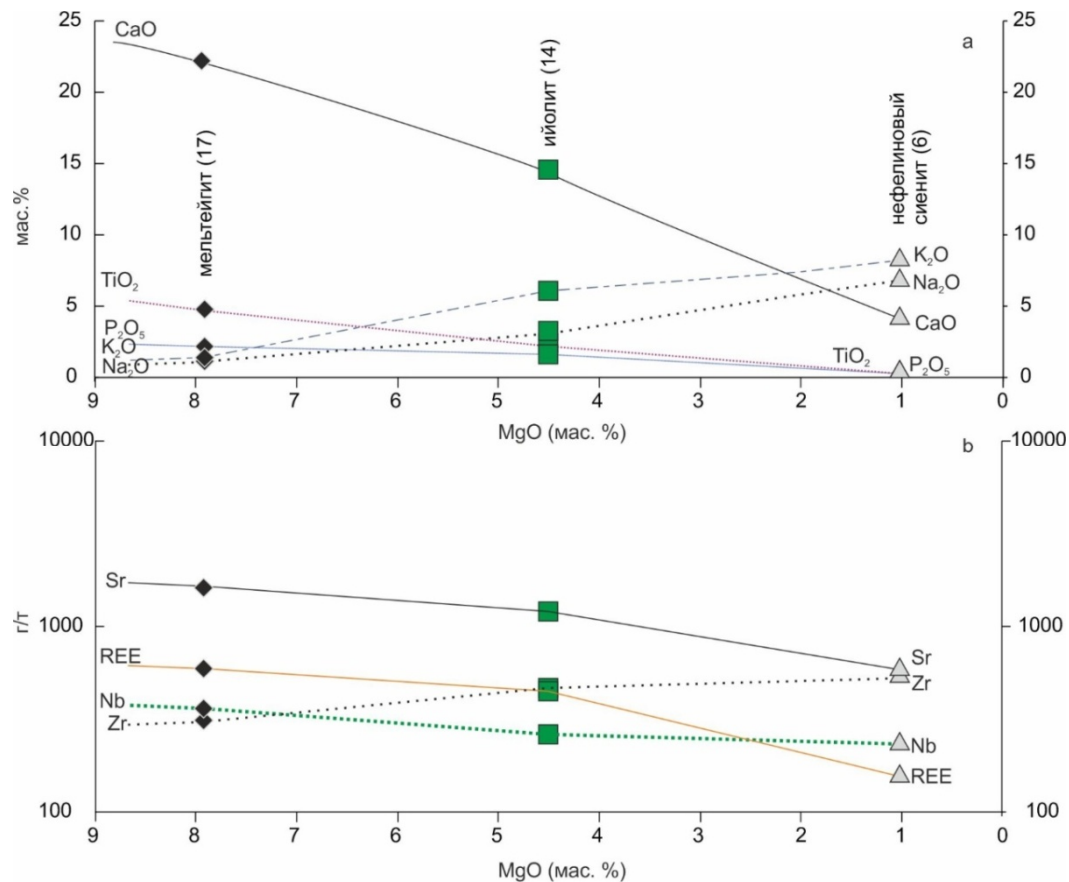


Рис. 14. Изменение содержаний некоторых основных компонентов и элементов примесей при кристаллизации щелочных силикатных расплавов карбонатитового комплекса Белая Зима

a: ось ординат – средние концентрации оксидов в основных разновидностях щелочных силикатных пород Белой Зимы; b: ось ординат – средние концентрации редких и редкоземельных элементов. Условные обозначения приведены на рис. 2. В скобках указано количество анализов.

Fig. 14. Content changes in the of some of the main components and elements of impurities during crystallization of alkaline silicate melts of the Belaya Zima carbonatite complex

a: the ordinate axis is the average concentration of oxides in the main varieties of alkaline silicate rocks of the Belaya Zima carbonatite complex; b: the ordinate axis is the average concentration of rare and rare earth elements. The legend is shown in fig. 2. The number of analyzes is indicated in parentheses

Подобное поведение РЗЭ с понижением их количества к поздним сиенитам отмечается во многих щелочно-ультраосновных карбонатитовых комплексах (например, Олдоинью-Ленгаи [Dawson et al., 1995], массивы Кольской щелочной провинции [Арзамасцев, Арзамасцева, 2013], породы провинции Маймеча-Котуй [Егоров, 1991 и др.].

Карбонатиты Белой Зимы эволюционировали от ранних кальцитовых к доломитовым и анкеритовым. Наиболее высокие концентрации Nb и Zr отмечены в кальцитовом карбонатите, а анкеритовые обогащены РЗЭ. Высокие содержания Nb–Ta и Zr–Hf в кальцитовых и кальцит-доломитовых карбонатитах, по сравнению с анкеритовыми разностями, объясняются ранней кристаллизацией пироклора и цирконолита. Высокие содержания лантаноидов в анкеритовых карбонатитах объясняется наличием карбонатов редкоземельных

элементов и монацита. В меньшей степени РЗЭ концентрируются в анкерите и доломите. Поведение РЗЭ и редких элементов при эволюции карбонатитов отразилось и на составе минералов карбонатитов: пироклора, амфибола, апатита и др. [Doroshkevich et al., 2017].

Выводы

Возраст 631 ± 11 млн лет, полученный по Pb/Pb изохроне для пород Белозиминского массива согласуется с предыдущими возрастными оценками и ложится в интервал значений образования щелочных карбонатитовых массивов, расположенных по краю Сибирского кратона.

Изотопно-геохимические данные для пород комплекса Белая Зима показали, что первичные расплавы формировались из гетерогенного умеренно де-

плетированного мантийного источника. Вероятный мантийный метасоматический агент имел карбонатный исходный состав. Первичные расплавы пород были сформированы из гранат-содержащего источника при низкой степени частичного плавления.

Поведение основных петрогенных и редких элементов в щелочных силикатных породах можно объяснить процессом кристаллизационной дифференциации. Для пород характерна ранняя кристаллизация перовскита, являющегося главным концентратом REE, Nb, что приводило к обеднению этими элементами ийолитов и щелочных сиенитов.

Минералого-петрографические исследования состава пород выполнены в ЦКП «Аналитический центр минералого-геохимических и изотопных исследований» ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ. Работа выполнена в рамках программ фундаментальных исследований ГИН СО РАН (базовый проект IX.129.1.2., № гос. рег. АААА-А16-116122110027-2) и ИГМ СО РАН (0330-2019-0002). Геохимические исследования пород (Sr–Nd–Pb изотопный и редко-элементный состав пород) выполнены за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 19-17-00019).

ЛИТЕРАТУРА

- Андреева И.А. Карбонатитовые расплавы в оливине и магнетите из редкометальных карбонатитов щелочного карбонатитового комплекса Белая Зима (Восточный Саян, Россия) // Доклады Академии наук. 2014. Т. 455, № 3. С. 562–566.
- Андреева И.А., Коваленко В.И., Кононкова Н.Н. Химический состав магмы (расплавных включений) мелилитсодержащего нефелинита карбонатитового комплекса Белая Зима, Восточный Саян // Доклады Академии наук. 2004. Т. 394, № 4. С. 518–522.
- Андреева И.А., Коваленко В.И., Никифоров А.В., Кононкова Н.Н. Состав магм, условия образования и генезис карбонатсодержащих ийолитов и карбонатитов щелочного комплекса Белая Зима, Восточный Саян // Петрология. 2007. Т. 15, № 6. С. 594–619.
- Арзамасцев А.А., Арзамасцева Л.В. Геохимические индикаторы эволюции щелочно-ультраосновных серий палеозойских массивов Фенноскандинавского щита // Петрология. 2013. Т. 2 (3). С. 277–308.
- Багдасаров Ю.А. О типах тантало-ниобиевых руд и некоторых особенностях их размещения в карбонатитах // Геология рудных месторождений. 1974. Т. 16, № 5. С. 15–24.
- Багдасаров Ю.А. Редкометальный рудный потенциал магматических и гидротермально-метасоматических карбонатитов // Геология рудных месторождений. 1994. № 4. С. 326–335.
- Багдасаров Ю.А., Вороновский С.Н. Новые данные К-Аг-возраста ультраосновных-щелочных карбонатитовых комплексов Восточного Саяна и некоторые вопросы их образования // Доклады Академии наук СССР. 1980. Т. 254, № 1. С. 171–175.
- Березина Л.А. Геохимия радиоактивных элементов в редкометальных карбонатитовых комплексах (на примере одного из массивов Сибири) // Геология месторождений редких элементов. М.: Недра, 1972. С. 154–174.
- Бородин Л.С., Капустин Ю.Л. Бербанкит первая находка в СССР // Доклады Академии наук СССР. 1962. Т. 147, № 2. С. 462–465.
- Булах А.Г., Иваников В.В. Проблемы минералогии и петрологии карбонатитов. Л.: Изд-во ЛГУ, 1984. 244 с.
- Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Ковач В.П., Травин А.В., Вингейт М.Т.Д. Лейкогранитный магматизм А-типа в эволюции континентальной коры западного обрамления Сибирского кратона // Геология и геофизика. 2007. Т. 48 (1). С. 5–21.
- Владыкин Н.В. Геохимия изотопов Sr и Nd щелочных и карбонатитовых комплексов Сибири и Монголии и некоторые геодинамические следствия // Проблемы источников глубинного магматизма и плюмы / ред. Н.В. Владыкин. Иркутск, 2005. С. 13–30.
- Врублевский В.В., Ревирдатто В.В., Изох А.Э., Гертнер И.Ф., Юдин Д.С., Тишин П.А. Неопротерозойский карбонатитовый магматизм Енисейского кряжа, центральная Сибирь: $^{40}\text{Ar}/\text{Ar}^{39}$ – геохронология пенчугинского комплекса // Доклады Академии наук. 2011. Т. 437, вып. 4. С. 514–519.
- Врублевский В.В., Сазонов А.М., Гертнер И.Ф., Тишин П.А., Колмаков Ю.В. Геохронология и магматические источники щелочных пород и карбонатитов южного Заангарья, Енисейский Кряж // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 320, № 1. С. 63–70.
- Гайдукова В.С., Здорик Т.Б. Минералы редких элементов в карбонатитах // Геология месторождений редких элементов. М.: Госгеолтехиздат, 1962. С. 86–117.
- Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Мазукабзов А.М., Станевич А.М., Скляр Е.В., Пономарчук В.А. Комплексы-индикаторы процессов растяжения на юге Сибирского кратона в докембрии // Геология и геофизика. 2007. Т. 48 (1). С. 22–41.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Сер. Алдано-Забайкальская. Лист О-52 – Томмот. СПб., 2016.
- Егоров Л.С. Ийолит-карбонатитовый плутонизм. Л.: Недра, 1991. 260 с.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. М.: Недра, 1990. Т. 2. 334 с.
- Когарко Л.Н., Хендерсон М., Фоланд К. Эволюция и изотопные источники Гулинского ультраосновного щелочного массива (Полярная Сибирь) // Доклады Академии наук. 1999. Т. 364, № 2. С. 235–237.
- Никифоров А.В., Лыхин А.В. Геохимия изотопов Sr и Nd в породах щелочно-ультраосновных массивов Восточно-Саянской провинции // Семинар «Геохимия щелочных пород» школы «Щелочной магматизм Земли». 2008. С. 24–27.
- Никифоров А.В., Лыхин Д.А. Источники рудных компонентов в породах щелочноультраосновных массивов Восточно-Саянской провинции: на основе изучения изотопного состава Sr и Nd // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). 2007. Вып. 5. С. 24–26.

- Ножкин А.Д., Туркина О.М., Баянова Т.Б., Бережная Н.Г., Ларионов А.Н., Постников А.А., Травин А.В., Эрнст Р.Е.** Неопротерозойский рифтогенный и внутритропный магматизм Енисейского кряжа как индикатор процессов распада Родинии // Геология и геофизика. 2008. Т. 49 (7). С. 666–688.
- Панина Л.И., Подгорных Н.М.** Включения расплавов в минералах карбонатитов Белозиминского массива // Доклады Академии наук СССР. 1975. Т. 233, № 6. С. 1447–1450.
- Панина Л.И., Подгорных Н.М.** Температуры кристаллизации минералов в карбонатитах щелочно-ультраосновных комплексов // Проблемы глубинного магматизма. М. : Наука, 1979. С. 222–230.
- Пожарицкая Л.К.** Минералого-петрографические особенности карбонатитов // Геологические месторождения редких элементов. 1962. Вып. 17. С. 70–86.
- Пожарицкая Л.К., Самойлов В.С.** Петрология, минералогия и геохимия карбонатитов Восточной Сибири. М. : Наука, 1972. 268 с.
- Рассказов С.В., Ильясова А.М., Конев А.А., Ясныгина Т.А., Масловская М.Н., Фефелов Н.Н., Демонтерова Е.И., Саранина Е.В.** Геохимическая эволюция Задойского щелочно-ультраосновного массива Присяня, юг Сибири // Геохимия. 2007. № 1. С. 3–18.
- Рипп Г.С., Дорошкевич А.Г., Посохов В.Ф.** Возраст карбонатитового магматизма Забайкалья // Петрология. 2009. Т. 17, № 1. С. 79–96.
- Рыцк Е.В., Шалаев В.С., Ризванова Н.Г., Крымский Р.Ш., Манеев А.Ф., Рилс Г.В.** Олоkitская зона Байкальской складчатой области: новые изотопно-геохронологические и петрогеохимические данные // Геотектоника. 2002. № 1. С. 29–41.
- Собаченко В.С., Плюснин Г.С., Сандимирова Г.П., Пахольченко Ю.А.** Рубидий-стронциевый возраст приразломных щелочных метасоматитов и гранитов Татарско-Пенченгинской зоны (Енисейский кряж) // Доклады Академии наук СССР. 1986. Т. 287, Вып. 5. С. 1220–1224.
- Соболев А.В., Соболев С.В., Кузьмин Д.В., Малич К.Н., Петрунин А.Г.** Механизм образования сибирских меймечитов и природа их связи с траппами и кимберлитами // Геология и геофизика. 2009. Т. 50 (12). С. 1293–1334.
- Сомина М.Я.** Доломитовые и анкеритовые карбонатиты Восточной Сибири. М. : Недра, 1975. 191 с.
- Субботин В.В., Субботина Г.Ф.** Минералы группы пироклора в фоскоритах и карбонатитах кольского полуострова // Вестник МГТУ Станкин. 2000. Т. 3, № 2. С. 273–284.
- Фролов А.А.** Структура и оруденение карбонатитовых массивов. М. : Недра, 1975. 161 с.
- Фролов А.А., Толстов А.Р., Белов С.В.** Карбонатитовые месторождения России. М. : НИИ Природа, 2003. 287 с.
- Хромова Е.А., Дорошкевич А.Г., Избродин И.А.** Распределение редкоземельных элементов в минералах из пород щелочного карбонатитового комплекса Белая Зима (Восточный Саян, Россия) // Геодинамика и минерагения северной и центральной Азии : V Всерос. науч.-практ. конф. 2017. С. 367–369.
- Чернышева Е.А., Конусова В.В., Смирнова Е.В., Чувашова Л.А.** Редкоземельные элементы в плутонической и дайковой сериях щелочных пород Нижнесаянского карбонатитового комплекса // Геохимия. 1994. № 11. С. 1591–1610.
- Шарыгин В.В., Дорошкевич А.Г., Хромова Е.А.** Nb-Fe-минералы группы цирконолита в кальцитовых карбонатитах Белозиминского массива (Восточный Саян) // Минералогия. 2016. № 4. С. 3–18.
- Ярмолюк В.В., Коваленко В.И.** Позднерифейский раскол Сибири и Лаврентии в проявлениях внутриплитного магматизма // Доклады Академии наук. 2001. Т. 379, № 1. С. 94–98.
- Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Сальникова Е.Б., Никифоров А.В., Котов А.Б., Владыкин Н.В.** Позднерифейский рифтогенез и распад Лавразии: данные геохронологических исследований щелочно-ультраосновных комплексов южного обрамления Сибирской платформы // Доклады Академии наук. 2005. Т. 404, № 3. С. 400–406.
- Andersen T., Taylor P.N.** Pb isotope geochemistry of the Fen carbonatite complex, S.E. Norway: Age and petrogenetic implications // Geochim. Cosmochim. Acta. 1988. V. 52. P. 209–215.
- Bell K.** Carbonatites: Relationships to mantle-plume activity // Geol. Soc. Amer. Spec. 2001. Paper 352. P. 267–290.
- Çimen O., Kuebler C., Simonetti S.S., Corcoran L., Mitchell R., Simonetti A.** Combined boron, radiogenic (Nd, Pb, Sr), stable (C, O) isotopic and geochemical investigations of carbonatites from the Blue River Region, British Columbia (Canada): Implications for mantle sources and recycling of crustal carbon Show affiliations // Chemical Geology. 2019. № 529. P. 119–240. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2019.07.015
- Dawson J.B., Smith J.V., Steele I.M.** Petrology and mineral chemistry of plutonic igneous xenoliths from the carbonatite volcano, Oldoinyo Lengai, Tanzania // Journal of Petrology. 1995. V. 36, № 3. P. 797–826. DOI: 10.1093/petrology/36.3.797
- Doroshkevich A.G., Veksler I.V., Izbrodin I.A., Ripp G.S., Khromova E.A., Posokhov V.F., Travin A.V., Vladyskin N.V.** Stable isotope composition of minerals in the Belaya Zima plutonic complex, Russia: Implications for the sources of the parental magma and metasomatizing fluids // J. Asian Earth Sci. 2016. V. 26. P. 81–96. DOI: 10.1016/j.jseas.2015.11.011
- Doroshkevich A.G., Veksler I.V., Klemd R., Khromova E.A., Izbrodin I.A.** Trace-element composition of minerals and rocks in the Belaya Zima carbonatite complex (Russia): Implications for the mechanisms of magma evolution and carbonatite formation // Lithos. 2017. V. 284. P. 91–108. DOI: 10.1016/j.lithos.2017.04.003
- Doroshkevich A.G., Wall F., Ripp G.S.** Calcite-bearing dolomite carbonatite dykes from Veseloe, North Transbaikalia, Russia and possible 29 Cr-rich mantle xenoliths // Mineralogy and Petrology. 2007. V. 90. P. 19–49.
- Doroshkevich A.G., Wall F., Ripp G.S.** Magmatic graphite in dolomite carbonatite at Pogranichnoe, North Transbaikalia, Russia // Contribution to Mineralogy and Petrology. 2007. V. 153. P. 339–353. DOI: 10.1007/s00410-006-0150-z
- Khromova E.A., Doroshkevich A.G., Sharygin V.V., Izbrodin I.A.** Compositional Evolution of Pyrochlore-Group Minerals in Carbonatites of the Belaya Zima Pluton, Eastern Sayan // Geology of Ore Deposit. 2017. № 8. P. 752–764. DOI: 10.1134/S1075701517080037
- Kwon S.T., Tilton G.R., Grünenfelder M.H.** Lead isotope relationships in carbonatites and alkalic complexes: an overview // Carbonatites: Genesis and Evolution / K. Bell (ed.). London : Unwin Hyman, 1989. P. 360–387.
- Le Bas M.J.** Nephelinites and carbonatites // Alkaline Igneous Rocks / J.G. Fitton and B.G.J. Upton (eds.) // Geol. Soc. Spec. Publ. 1987. № 30. P. 53–83. DOI: 10.1144/GSL.SP.1987.030.01.05
- McDonough W.F., Sun S.-s.** The composition of the Earth // Chem. Geol. 1995. V. 120. P. 223–253.

Morikiyo T., Takano K., Miyazaki T., Kagami H., Vladyskin N.V. Sr, Nd, C and O isotopic compositions of carbonatite and per-alkaline silicate rocks from the Zhidoy complex, Russia: evidence for binary mixing, liquid immiscibility and a heterogeneous depleted mantle source region // *Jour. Mineral. Petrol. Sci.* 2000. V. 95/ P. 162–172. DOI: 10.2465/jmps.95.162

Prowatke S., Klemme S. Trace element partitioning between apatite and silicate melts // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 2006. V. 70. P. 4513–4527.

Salnikova E.B., Chakhmouradian A.R., Stifeeva M.V., Reguir E.P., Kotov A.B., Gritsenko Y.D., Nikiforov A.V. Calcic garnets as a geochronological and petrogenetic tool applicable to a wide variety of rocks // *Lithos.* 2019. V. 338. P. 141–154. DOI: 10.1016/j.lithos.2019.03.032

Savatenkov V.M., Morozova I.M., Levsky L.K. Behavior of the Sm-Nd, Rb-Sr, K-Ar, and U-Pb isotopic systems during alkaline metasomatism: Fenites in the outer-contact zone of an ultramafic-alkaline intrusion // *Geochemistry International.* 2004. V. 42 (10). P. 899–920.

Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Menshagin Yu.V., Watanabe T., Pisarevsky S.A. Neoproterozoic mafic dike swarms of the Sharyzhalsky metamorphic massif (southern Siberian craton) // *Prec. Res.* 2003. V. 22. P. 359–377. DOI: 10.1016/S0301-9268(02)00219-X

Sun S.-s., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 1989. V. 42. P. 313–345. DOI: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19

Veksler I.V., Nielsen T.F., Sokolov S.V. Mineralogy of crystallized melt inclusions from Gardiner and Kovdor ultramafic alkaline complexes: implications for carbonatite genesis // *J. Petrol.* 1998. V. 39. P. 2015–2031. DOI: 10.1093/ptro/39.11-12.2015

Veksler I.V., Teptev M.P. Conditions for crystallization and concentration of perovskite-type minerals in alkaline magmas // *Lithos.* 1990. V. 26, № 1/2. P. 177–189. DOI: 10.1016/0024-4937(90)90047-5

Vladyskin N.V., Morikiyo T., Miyazaki T. Geochemistry of Sr and Nd isotopes in 19 carbonatites of Siberia and Mongolia and some geodynamic consequences // *Problems of sources of deep magmatism and plumes. Petropavlovsk-Kamchatsky–Irkutsk.* 2005. P. 19–35.

Watson E.B., Green T.H. Apatite/liquid partition coefficients for the rare earth elements and strontium // *Earth and Planetary Science Letters.* 1981. V. 56. P. 405–421.

Woolley A.R., Kempe D.R.C. Carbonatites: nomenclature, average chemical composition and element distribution // *Carbonatites: genesis and evolution.* London, 1989. P. 1–46.

Авторы:

Хромова Елена Александровна, младший научный сотрудник, лаборатория инструментальных методов анализа, Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия.

E-mail: lena.khromova.00@mail.ru

Дорошкевич Анна Геннадьевна, доктор геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией рудоносности щелочного магматизма, Институт геологии и минералогии им. И.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: doroshkevich@igm.nsc.ru

Избродин Иван Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией петрологии, Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия.

E-mail: izbrodin@ginst.ru

Geosphere Research, 2020, 1, 33–55. DOI: 10.17223/25421379/14/3

E.A. Khromova¹, A.G. Doroshkevich^{1,2}, I.A. Izbrodin¹

¹ *Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia*

² *V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia*

GEOCHEMICAL AND Sr-Nd-Pb ISOTOPIC CHARACTERISTICS OF ALKALINE ROCKS AND CARBONATITE OF THE BELAYA ZIMA MASSIF (EASTERN SAYAN)

Belaya Zima alkaline carbonatite complex (East Sayan, Russia) is a multiphase intrusion of the central type. The carbonatite stock is exposed in the central part of the complex, which is composed of different mineralized carbonatite. Alkaline silicate rocks form ring-shaped bodies surrounding the central carbonatite and are represented by melteigites and ijolites, dyke-shaped bodies of alkaline syenites.

The article presents the results of Pb/Pb dating, petrological and geochemical studies, including radiogenic (Nd, Pb and Sr) isotopic data.

The age value of 631 ± 11 Ma, obtained from the Pb/Pb isochron line for all rocks of intrusion, is consistent with the previous age determinations [643 ± 3 Ma, Yarmolyuk et al. 2005 and 645 ± 6 Ma, Doroshkevich et al., 2016; 645 ± 6 Ma, Salnikova et al., 2019]. The age is in the range of 700–600 Ma, the interval of the formation of alkaline carbonatite complexes located along the edge of the Siberian craton (Aldan-Stanovoy shield, Yenisei Ridge, East Sayan). Emplacement of the complexes is associated with the final stage of the break-up of the Rodinia supercontinent [Yarmolyuk et al., 2005].

Melteigites are more magnesium (Mg # = 28–35) in comparison with ijolites (Mg # = 24–30) and alkaline syenites (Mg # = 15–29), which proves the lowest degree of differentiation of the former. The low total Mg # of the Belaya Zima alkaline silicate rocks, their low nickel and chromium concentrations confirm the fact that olivine crystallization has completed. Early crystallization of perovskite in melteigites led to depletion of the residual melt in REEs and Nb and formation of REE-depleted ijolites and nepheline syenites.

There are the evolution trend of HFSE and REEs from early calcite carbonatite to calcite-dolomite and ankerite carbonatites. The calcite and calcite-dolomite carbonatites have the highest contents of Nb-Ta and Zr-Hf and reflect the early crystallization of pyrochlore and zirconolite. Late ankerite carbonatites are enriched in REEs in comparison with calcite and calcite-dolomite carbonatites, are REEs are concentrated in rare earth carbonates and monazite (Ce).

Isotopic data ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.702672\text{--}0.703125$ and $\varepsilon_{\text{Nd}}(T) = 3.14\text{--}4.97$) for rocks of the Belaya Zima complex indicate that primary melts were formed from a heterogeneous, moderately depleted mantle source. The high concentration of incompatible elements in the rocks (Sr and Nb, La/Sm ratio), the presence of carbonatites in the complex indicate that the possible mantle metasomatic agent had a carbonate initial composition. This conclusion is confirmed by the results of melt inclusions study in minerals from the Belaya Zima ijolites [Andreeva et al., 2007]. A high Gd/Yb ratio (up to 7) in the rocks indicates that they were derivatives of primary melts formed by low degree of partial melting of a garnet-bearing source.

Keywords: Belaya Zima massif, carbonatites, alkaline silicate rocks, trace elements, Sr–Nd isotopic data, mantle source, Pb/Pb age, breakup of the Rodinia supercontinent.

REFERENCES

- Andreeva I.A. Carbonatitic melts in olivine and magnetite from rare-metal carbonatite of the Belaya Zima alkaline carbonatite complex (East Sayan, Russia) // *Doklady Earth Sciences*. 2014. V. 455. № 23. pp. 436–440.
- Andreeva I.A., Kovalenko V.I., Kononkova N.N. Chemical composition of magma (melt inclusions) of melilite-bearing nephelinite from the Belaya Zima Carbonatite Complex, Eastern Sayan // *Doklady Earth Sciences*. 2004. V. 394. № 1. pp. 116–119.
- Andreeva I.A., Kovalenko V.I., Nikiforov A.V., Kononkova N.N. Compositions of magmas, formation conditions, and genesis of carbonate-bearing ijolites and carbonatites of the Belaya Zima alkaline carbonatite complex, Eastern Sayan // *Petrology*. 2007. V. 15. № 6. pp. 551–574.
- Arzamastsev A.A., Arzamastseva L.V. Geochemical indicators of the evolution of the ultrabasic-alkaline series of Paleozoic massifs of the Fennoscandian shield // *Petrology*. 2013. V. 21. pp. 249–279. Doi: 10.1134/S0869591113020021
- Bagdasarov Y.A. *O tipah tantalito-niobievyyh rud i nekotorykh osobennostyakh ih razmeshheniya v karbonatitakh* [Types of tantalum-niobium ores and some features of their placement in carbonatites] // *Geology of Ore Deposit*. 1974. V. 16. № 5. pp. 15–24. In Russian
- Bagdasarov Y.A. *Redkometal'nyy rudnyy potencial magmaticheskikh i gidrotermal'no-metasomaticheskikh karbonatitov* [Rare-metal ore potential of magmatic and hydrothermal-metasomatic carbonatites] // *Geology of Ore Deposit*. 1994. № 4. pp. 326–335. In Russian
- Bagdasarov Y.A., Voronovsky S.N. *Novye dannye K–Ar-vozrasta ul'traosnovnykh - shhelochnykh karbonatitovykh kompleksov Vostochnogo Sajana i nekotorye voprosy ih obrazovaniya* [New K–Ar dating of ultrabasic-alkaline carbonatite massifs of the East Sayan and some questions of their formation] // *Doklady Sci. USSR*. 1980. V. 254. № 1. pp. 171–175. In Russian
- Berezina L.A. *Geokhimiya radioaktivnykh jelementov v redkometal'nykh karbonatitovykh kompleksakh (na primere odnogo iz massivov Sibiri)* [Geochemistry of radioactive elements in the rare-metal carbonatite complexes (on example of a massif in Siberia)] // *Geologiya mestorozhdenij redkikh jelementov*. Moscow: Nedra. 1972. pp. 154–174. In Russian
- Borodin L.S., Kapustin Ju.L. *Berbankit pervaja nahodka v USSR* [The first discovery of Burbankite in the USSR] // *Doklady Sci. USSR*. 1962. V. 147. № 2. pp. 462–465. In Russian
- Bulakh A.G., Ivanikov V.V. *Problemy mineralogii i petrologii karbonatitov* [Problems of mineralogy and petrology of carbonatites]. Leningrad: Izd-vo LGU, 1984. 244 p. In Russian
- Vernikovskaya A.E., Vernikovskiy V.A., Travin A.V., Sal'nikova E.B., Kotov A.B., Kovach V.P., Wingate M.T.D. A-type leucogranite magmatism in the evolution of continental crust on the western margin of the Siberian craton // *Russian Geology and Geophysics*. 2007. V. 1. P. 3–16.
- Vladykin N.V. Geochemistry of Sr and Nd isotopes in carbonatites of Siberia and Mongolia and some geodynamic consequences // *Problems of sources of deep magmatism and plumes* (red. N.V. Vladykin). Irkutsk, 2005. pp. 19–38.
- Vrublevskii V.V., Reverdatto V.V., Izokh A.E., Gertner I.F., Yudin D.S., Tishin P.A. Neoproterozoic carbonatite magmatism of the Yenisei Ridge, Central Siberia: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Penchenga rock complex] // *Doklady Earth Sciences*. 2011. V. 437. № 2. pp. 443–448.
- Vrublevskii V.V., Sazonov A.M., Gertner I.F., Tishin P.A., Kolmakov Ju.V. *Geokhronologiya i magmaticheskie istochniki shhelochnykh porod i karbonatitov juzhnogo Zaangar'ja, Enisejskij Krjash* [Geochronology and magmatic sources of alkaline rocks and carbonatites of the southern Zaangarya, Yenisei Ridge] // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2012. V. 320. № 1. pp. 63–70. In Russian
- Gaidukova V.S., Zdorik T.B. *Mineraly redkikh jelementov v karbonatitakh* [Minerals of rare elements in carbonatites] // *Geologiya mestorozhdenij redkikh jelementov*. Moscow: Gosgeoltekhizdat. 1962. pp. 86–117. In Russian
- Gladkochub D.P., Donckaya T.V., Mazukabzov A.M., Stanevich A.M., Sklyarov E.V., Ponomapchuk V.A. Signature of Precambrian extension events in the southern Siberian craton // *Russian Geology and Geophysics*. 2007. V. 48(1). pp. 17–31. Doi: 10.1016/j.rgg.2006.12.001
- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Ros-siyskoy Federatsii* [State geological map of the Russian Federation]. Scale 1:1000000 (third generation). Series Aldan-Transbaikal. Sheet № O-52 – Tommot. St.-Petersburg: Cartographic factory VSEGEI. 2016. In Russian
- Egorov L.S. *Ijolit-karbonatitovyj plutonizm* [Ijolite-carbonatite plutonism]. Leningrad: Nedra, 1991. 260 p. In Russian
- Zonenshajn L.P., Kuz'min M.I., Natapov L.M. *Tektonika litosfernykh plit territorii USSR* [Tectonics of lithospheric plates on the territory of the USSR] T. 2. Moscow: Nedra, 1990. 334 p. In Russian
- Kogarko L. N., Henderson M., Foland K. The Guli ultrabasic alkaline massif in polar Siberia: evolution and isotope sources // *Doklady Earth Sciences*. 1999. V. 364. pp. 88–90.
- Nikiforov A.V., Lyhin A.V. *Geokhimiya izotopov Sr i Nd v porodakh shhelochno-ul'traosnovnykh massivov Vostochno-Sajanskoy provincii* [Geochemistry of Sr and Nd isotopes in rocks of alkaline-ultrabasic massifs of the Eastern Sayan province] // *Seminar "Geokhimiya alkali rock"*. 2008. pp. 24–27. In Russian
- Nikiforov A.V., Lyhin D.A. *Istochniki rudnykh komponentov v porodakh shhelochnoul'traosnovnykh massivov Vostochno-Sajanskoy provincii: na osnove izuchenija izotopnogo sostava Sr i Nd* [Sources of ore components in the rocks of the alkaline-ultrabasic massifs of

- the Eastern Sayan province: based on the study of the isotopic composition of Sr and Nd] // Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from ocean to continent). 2007. V. 5. pp. 24–26. In Russian
- Nozhkin A.D., Turkina O.M., Bayanova T.B., Berezhnaya N.G., Larionov A.N., Postnikov A.A., Travin A.V., Ernst P.E. Neoproterozoic rift and within-plate magmatism in the Yenisei Ridge: implications for the breakup of Rodinia // Russian Geology and Geophysics. 2008. V. 49(7). pp. 503–519. Doi: 10.1016/j.rgg.2008.06.007
- Panina L.I., Podgorniy N.M. *Vkljuchenija rasplavov v mineralah karbonatitov Beloziminskogo massiva* [Melt inclusions in minerals of carbonatites of the Belaya Zima massif] // Doklady AS USSR. 1975. V. 233. № 6. pp. 1447–1450. In Russian
- Panina L.I., Podgorniy N.M. *Temperatury kristallizacii mineralov v karbonatitah shhelochno-ul'traosnovnykh kompleksov* [The temperatures of crystallization of minerals in carbonatites of alkaline-ultramafic complexes] / Problemy glubinnogo magmatizma. Moscow: Nauka, 1979. pp. 222–230. In Russian
- Pozharickaja L.K. *Mineralogo-petrograficheskie osobennosti karbonatitov* [Mineral and petrographic features of carbonatites] // Geologicheskie mestorozhdenija redkih jelementov. 1962. V. 17. pp. 70–86. In Russian
- Pozharickaja L.K., Samojlov B.C. *Petrologija, mineralogija i geohimija karbonatitov Vostochnoj Sibiri* [Petrology, mineralogy and geochemistry of carbonatites from East Siberia]. Moscow: Nauka, 1972. 268 p. In Russian
- Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Konev A.A., Yasnygina T.A., Maslovskaya M.N., Fefelov N.N., Demonterova E.I., Saranina E.V. Geochemical evolution of the Zadoi alkaline-ultramafic massif, Cis-Sayan area, southern Siberia // Geochemistry International. 2007. V. 45. pp. 1–14. Doi: 10.1134/S0016702907010016
- Ripp G.S., Doroshkevich A.G., Posokhov V.F. Age of carbonatite magmatism of Transbaikalia // Petrology. 2009. V. 17. pp. 73–89. DOI: 10.1134/S0869591109010044
- Ryt'sk E.V., Shalaev V.S., Rizvanova N.G., Krymsky P.Sh., Maneev A.F., Rils G.V. *Olokitskaja zona Bajkal'ckoj kkladchatoj oblacti: novye izotopno-geoxponologicheskie i petpogeoximicheskie dannye* [Olokitsky zone of the Baikal folding region: new isotope-geochronological and petrogeochemical data] // Geotectonics. 2002. V. 1. pp. 29–41. In Russian
- Sobachenko V.S., Plyusnin G.S., Sandimirova G.P., Pakholchenko Yu.A. *Rubidij-stronciyevyj vozrast prirazlomnykh shhelochnykh metosomatitov i granitov Tatarsko-Penchenginskoy zony (Enisejskij krjazh)* [Rubidium-strontium age of fracture alkaline metosomatites and granites of the Tatar-Penchenginsky zone (Yenisei Ridge)] // Doklady AS USSR. 1986. V. 287. pp. 1220–1224. In Russian
- Sobolev A.V., Sobolev S.V., Kuz'min D.V., Malich K.N., Petrunin A.G. Siberian meimechites: origin and relation to flood basalts and kimberlites // Russian Geology and Geophysics. 2009. V. 50. pp. 1293–1334. DOI: 10.1016/j.rgg.2009.11.002
- Somina M.Ya. *Dolomitovye i ankeritovye karbonatity Vostochnoj Sibiri*. [Dolomite and ankerite carbonatites of Eastern Siberia]. Moscow: Nedra, 1975. 191 p. In Russian
- Subbotin V.V., Subbotina G.F. *Mineraly grupy pirohlora v foskoritah i karbonatitah kol'skogo poluostrova* [Minerals of the pyrochlore group in phoscorites and carbonatites of the Kola Peninsula] // Vestnik MGTU Stankin. 2000. V. 3, № 2. pp. 273–284. In Russian
- Frolov A.A. *Struktura i orudenenie karbonatitovykh massivov* [The structure and mineralization of carbonatite massifs]. Moscow, Nedra, 1975. 161 p. In Russian
- Frolov A.A., Tolstov A.R., Belov S.V. *Karbonatitovye mestorozhdenija Rossii* [Carbonatite deposits of Russia]. Moscow: NIA Priroda. 2003. 287 p. In Russian
- Khromova E.A., Doroshkevich A.G., Izbrodin I.A. *Raspredelenie redkozemel'nykh jelementov v mineralah iz porod shhelochnogo karbonatitovogo kompleksa Belaja Zima (Vostochnyj Sajan, Rossiya)* [Distribution of rare earth elements in minerals from the rocks of the Belaya Zima alkaline carbonatite complex (Eastern Sayan, Russia)] // V Scientific and practical conference: Geodynamics and Minerageny of North and Central Asia. 2017. pp. 367–369. In Russian
- Chernysheva E.A., Konusova V.V., Smirnova E.V., Chuvashova L.A. *Redkozemel'nye jelementy v plutonicheskoy i dajkovoj serijah shhelochnykh porod Nizhnesajanskogo karbonatitovogo kompleksa* [Rare Earth Elements in the plutonic and dike series of alkaline rocks of the Nizhnesajanskii carbonatite complex] // Geokhimiya. 1994. № 11. pp. 1591–1610. In Russian
- Sharygin V.V., Doroshkevich A.G., Khromova E.A. *Nb-Fe-mineraly grupy cirkonolita v kal'citovykh karbonatitah Beloziminskogo massiva (Vostochnyj Sajan)* [Nb-Fe - minerals of the zirconolite group in calcite carbonatites of the Belaya Zima massif (East Sayan)] // Mineralogy. 2016. V. pp. 3–18. In Russian
- Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I. Late Riphean breakup between Siberia and Laurentia: Evidence from intraplate magmatism // Doklady Earth Sciences. 2001, V. 379. pp. 525–528.
- Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Salnikova E.B., Nikiforov A.V., Kotov A.B., Vladykin N. 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. 2005. V. 404, № 7. pp. 1031–1036.
- Andersen T., Taylor, P.N. Pb isotope geochemistry of the Fen carbonatite complex, S.E. Norway: Age and petrogenetic implications // Geochim. Cosmochim. Acta. 1988. 52. pp. 209–215.
- Bell K. Carbonatites: Relationships to mantle-plume activity // Geol. Soc. Amer. Spec. 2001. Paper 352. pp. 267–290.
- Çimen O., Kuebler C., Simonetti S.S., Corcoran L., Mitchell R., Simonetti A. Combined boron, radiogenic (Nd, Pb, Sr), stable (C, O) isotopic and geochemical investigations of carbonatites from the Blue River Region, British Columbia (Canada): Implications for mantle sources and recycling of crustal carbon Show affiliations // Chemical Geology. 2019. № 529. pp. 119–240. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2019.07.015
- Dawson J.B., Smith J.V., Steele I.M. Petrology and mineral chemistry of plutonic igneous xenoliths from the carbonatite volcano, Oldoinyo Lengai, Tanzania // Journal of Petrology. 1995. V. 36. № 3. pp. 797–826. doi.org/10.1093/petrology/36.3.797
- Doroshkevich A.G., Veksler I.V., Izbrodin I.A., Ripp G.S., Khromova E.A., Posokhov V.F., Travin A.V., Vladykin N.V. Stable isotope composition of minerals in the Belaya Zima plutonic complex, Russia: Implications for the sources of the parental magma and metasomatizing fluids. // J. Asian Earth Sci. 2016. V. 26. pp. 81–96. doi.org/10.1016/j.jseas.2015.11.011
- Doroshkevich A.G., Veksler I.V., Klemd R., Khromova E.A., Izbrodin I.A. Trace-element composition of minerals and rocks in the Belaya Zima carbonatite complex (Russia): Implications for the mechanisms of magma evolution and carbonatite formation // Lithos. 2017. 284–285. pp. 91–108. doi: 10.1016/j.lithos.2017.04.003
- Doroshkevich A.G., Wall F., Ripp G.S. Calcite-bearing dolomite carbonatite dykes from Veseloe, North Transbaikalia, Russia and

possible 29 Cr-rich mantle xenoliths // *Mineralogy and Petrology*. 2007. V.90. pp. 19–49.

Doroshkevich A.G., Wall F., Ripp G.S. Magmatic graphite in dolomite carbonatite at Pogranichnoe, North Transbaikalia, Russia // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 2007. V.153. pp. 339–353. doi: 10.1007/s00410-006-0150-z

Khromova E.A., Doroshkevich A.G., Sharygin V.V., Izbrodin I.A. Compositional Evolution of Pyrochlore-Group Minerals in Carbonatites of the Belaya Zima Pluton, Eastern Sayan // *Geology of Ore Deposit*. 2017. №. 8. pp. 752–764. doi 10.1134/S1075701517080037

Kwon S.T., Tilton G.R., Grünenfelder M.H. Lead isotope relationships in carbonatites and alkalic complexes: an overview. In: Bell, K. (Ed.), *Carbonatites: Genesis and Evolution*. Unwin Hyman, London. 1989. pp. 360–387.

Le Bas M.J. Nephelinites and carbonatites // *Alkaline Igneous Rocks*. Editors: Fitton J.G. and Upton B.G.J. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 1987. № 30. pp. 53–83. doi 10.1144/GSL.SP.1987.030.01.05

McDonough W.F., Sun S.-s. The composition of the Earth. *Chem. Geol.* 1995. 120. pp. 223–253.

Morikiyo T., Takano K., Miyazaki T., Kagami H., Vladyskin N.V. Sr, Nd, C and O isotopic compositions of carbonatite and peralkaline silicate rocks from the Zhidoy complex, Russia: evidence for binary mixing, liquid immiscibility and a heterogeneous depleted mantle source region // *Jour.Mineral.Petrol.Sci.* 2000. V. 95, pp. 162–172. Doi: 10.2465/jmps.95.162

Prowatke S., Klemme S. Trace element partitioning between apatite and silicate melts // *Geochimica et Cosmochimica Acta* 2006. 70. pp. 4513–4527. doi 10.1016/j.gca.2006.06.162

Salnikova E.B., Chakhmouradian A.R., Stifeeva M.V., Reguir E.P., Kotov A.B., Gritsenko Y.D., Nikiforov A.V. Calcic garnets as a geochronological and petrogenetic tool applicable to a wide variety of rocks // *Lithos*. 2019. V. 338. pp. 141–154. Doi: 10.1016/j.lithos.2019.03.032

Savatenkov V.M., Morozova I.M., Levsky L.K.. Behavior of the Sm-Nd, Rb-Sr, K-Ar, and U-Pb isotopic systems during alkaline metasomatism: Fenites in the outer-contact zone of an ultramafic-alkaline intrusion // *Geochemistry International*. 2004. 42(10). pp. 899–920.

Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Menshagin Yu.V., Watanabe T., Pisarevsky S.A. Neoproterozoic mafic dike swarms of the Sharyzhalgai metamorphic massif (southern Siberian craton) // *Prec. Res.* 2003. V. 22. pp. 359–377. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00219-X](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00219-X)

Sun S.-s., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. // *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 1989. 42. pp. 313–345. Doi: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19

Veksler I.V., Nielsen T.F., Sokolov S.V. Mineralogy of crystallized melt inclusions from Gardiner and Kovdor ultramafic alkaline complexes: implications for carbonatite genesis // *J. Petrol.* 1998. 39. pp. 2015–2031. doi 10.1093/ptro/39.11-12.2015

Veksler I.V., Tepteleev M.P. Conditions for crystallization and concentration of perovskite-type minerals in alkaline magmas // *Lithos*. 1990. V. 26, № 1/2. pp. 177–189. doi 10.1016/0024-4937(90)90047-5

Vladyskin N.V., Morikiyo T., Miyazaki T. Geochemistry of Sr and Nd isotopes in 19 carbonatites of Siberia and Mongolia and some geodynamic consequences // *Problems of sources of deep magmatism and plumes, Petropavlovsk-Kamchatsky – Irkutsk*. 2005. pp. 19–35.

Watson E.B., Green T.H. Apatite/liquid partition coefficients for the rare earth elements and strontium. *Earth and Planetary Science Letters*. 1981. V. 56. pp. 405–421.

Woolley A.R., Kempe D.R.C. Carbonatites: nomenclature, average chemical composition and element distribution // *Carbonatites: genesis and evolution*. London. 1989. pp. 1–46.

Author's:

Khromova Elena A., Junior Researcher, Laboratory of instrumental methods of analysis, Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia.

E-mail: lena.khromova.00@mail.ru

Doroshkevich Anna G., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory of ore-bearing alkaline magmatism, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: doroshkevich@igm.nsc.ru

Izbrodin Ivan A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory of petrology, Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia.

E-mail: izbrodin@iginst.ru