

УДК 552.331.4 + 553.493.6 + 550.93

U–Pb-ВОЗРАСТ ЗЁРЕН СФЕНА, ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ, МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОД МАССИВА БОГДО (АРКТИЧЕСКАЯ СИБИРЬ)

Академик РАН Н. Л. Добрецов¹, С. М. Жмодик^{1,2,*}, Е. В. Лазарева¹,
А. В. Толстов^{1,3}, Д. К. Беянин^{1,2}, О. Н. Сурков¹, Н. Н. Добрецов¹,
Н. В. Родионов⁴, С. А. Сергеев⁴

Поступило 21.08.2019 г.

На севере Сибирской платформы, восточнее Анабарского щита, известно несколько выявленных массивов щелочных пород с карбонатитами: Томторский, Богдо, Промежуточный, а также прогнозируемых по геофизическим данным Буолкалах, Чюэмпэ, Уэле, образующих крупную щелочно-карбонатитовую провинцию. Получены первые данные о составе щелочных пород массива Богдо, которые соответствуют группе фельдшпатоидных пород основного состава: рисчорритам, биотит-эгириновым либнеритовым сиенитам, карбонатизированным, с симплектитами и нефелин-полевошпатовыми агрегатами, псевдолейцитовым нефелиновым сиенитам. Из различных типов пород массива Богдо выделены зёрна сфена и определён с помощью вторично-ионного микрозонда SHRIMP-II их U–Pb-возраст. Рассчитанный U–Pb-возраст соответствует $394,4 \pm 3,2$ млн лет, что близко к возрастному этапу, установленному для массива Томтор, и к возрасту пород Кольской щелочной провинции. Одной из причин проявления щелочного плюмового магматизма на этой территории может быть влияние периферической зоны Africa Large Low Shear Velocity Province (“Tuzo”) в девонскую эпоху на Балтику и Сибирь.

Ключевые слова: фельдшпатоидные породы, массив Богдо, рисчорриты, либнеритовые и псевдолейцитовые сиениты, U–Pb-возраст, сфен, Арктическая Сибирь.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524893281-285>

На севере Сибирской платформы, восточнее Анабарского щита, известно несколько выявленных массивов щелочных пород с карбонатитами: Томторский, Богдо, Промежуточный, а также прогнозируемых по геофизическим данным Буолкалах, Чюэмпэ, Уэле, образующих в целом достаточно крупную щелочно-карбонатитовую провинцию. Массивы располагаются среди известняков, доломитов, терригенных метаморфизованных пород NP_1 – NP_3 -возраста и перекрываются континентальными (Р-возраста), морскими (J-возраста) и рыхлыми (Q-возраста) отложениями. Положение массивов контролируется меридиональной рифтогенной структурой — Уджинским сводом — и пересекающими её трансформными разломами. На теневых моделях рельефа и спектрзональных космических снимках положение Томторского и Богдинского

массивов подчёркивается кольцевыми структурами, осложнёнными разломными зонами субширотного (Томторский массив) и северо-восточного направлений (массив Богдо). Центральная часть массива Богдо примерно совпадает с геологическим центром крупной кольцевой структуры. В магнитном и особенно гравитационном полях массивы выделяются положительными округлыми аномалиями.

Массив Богдо расположен в 20–40 км на север от наиболее крупного Томторского массива. Сведения о массиве Богдо крайне фрагментарны. Возраст его определён K–Ar-методом для нефелиновых сиенитов, ювита, мельтейгита, биотита и калишпата — от 338 до 421 млн лет. Скорректированное на возраст значение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ равно 0,7043 и сопоставляется с фойдолитами Томторского массива [1, 2]. Данные о минералого-геохимических особенностях и возрасте щелочных массивов представляют значительный интерес с точки зрения обоснования масштабов распространения щелочного магматизма и оруденения томторского типа.

В плане массив Богдо имеет форму овала, размерами около 7–8 км и характеризуется концентрически-зональным, слабо асимметричным строением (рис. 1). Массив Богдо может быть отнесён к фор-

¹ Институт геологии и минералогии им. Соболева Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

³ НИГП АК АЛРОСА, Мирный, Республика Саха (Якутия)

⁴ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург

*E-mail: zhmodik@igm.nsc.ru

мации ультраосновных щелочных пород и карбонатитов. По данным геологического картирования периферическая часть массива выполнена скарнированными, фенитизированными и мраморизованными известняками. В центральной части массива выделяется блок кальцитовых карбонатитов. Основная площадь массива представлена нефелиновыми сиенитами и ювитами, среди которых в виде полукольцевых участков распространены породы якупирангит-ийолитовой серии и “поздних” карбонатитов.

Нами был детально изучен керн скважины № 3257.5, вскрывающей на глубине 32–42 м в разной степени изменённые щелочные породы массива. В зависимости от количеств калиевого полевого шпата, нефелина, лейцита, эгирина, биотита и изменений породы имеют различные текстурные и структурные особенности: представлены как мелкозернистыми, так и крупнозернистыми разновидностями. Макро- и микроскопически породы могут быть разделены на четыре типа: 1 — крупнозернистые лейкократовые светло-серой или зеленовато-серой окраски полевошпат-нефелиновые сиениты

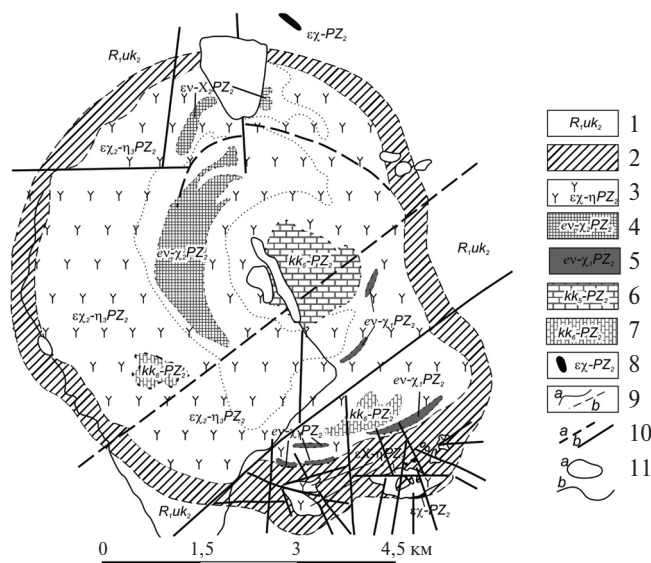


Рис. 1. Схематическая геологическая карта массива Богдо (Анабарский район, Арктическая Сибирь, Россия) (по материалам [3]). 1 — улахан-курунгская свита: доломиты с линзами и желваками кремней; 2 — зона скарнирования, фенитизации и мраморизации; 3 — ювиты, нефелиновые сиениты; 4 — метасоматизированные породы якупирангит-ийолитовой серии; 5 — породы якупирангит-ийолитовой серии: якупирангиты, ийолиты мельтейгиты; 6 — ранние кальцитовые карбонатиты; 7 — карбонатиты кальцитовые, доломитовые, анкеритовые; 8 — пикриты, альнётиты; 9 — геологические границы: *a* — достоверные; *b* — предполагаемые; 10 — разрывные нарушения: *a* — достоверные; *b* — предполагаемые; 11: *a* — озёра; *b* — реки.

(рисчорриты) пойкилитовой структуры с пироксеном, биотитом, амфиболом, сфеном (рис. 2); 2 — средне- и 3 — мелкозернистые тёмно-серые с красно-коричневыми идиоморфными кристаллами изменённого нефелина — либнерита (псевдоморфозы серицита по нефелину, представленные микрозернистым серицит-нефелиновым агрегатом), К–Ва-полевым шпатом, меланитом — биотит-эгириновые либнеритовые сиениты; 4 — светло-серые пятнистые пойкилитовой структуры карбонатизированные с симплектитам и нефелин-полевошпатовыми агрегатами псевдолейцитовые нефелиновые сиениты (ПЛНС) (рис. 2). Породы массива Богдо содержат Zr–Nb-рутилы, сложные оксиды, карбонаты и силикаты Ti, Zr, Nb, REE, реже фосфаты — апатит и монацит. В породах широко распространены зёрна сфена с низкими содержаниями железа (от 1,45 до 2,36 мас.% FeO). В то же время цирконы в породах не были обнаружены, а только единичные зёрна бадделита.

Уровень содержания SiO_2 в породах соответствует группе основных пород (49,0–52,6 мас.%), но с высокими концентрациями Al_2O_3 (20,5–23,6 мас.%) и $Na_2O + K_2O$ (12,3–17,4 мас.%), с преобладанием K_2O (8,16–11,4 мас.% и Na_2O/K_2O 0,11–0,84), а также низкими содержаниями CaO (1,08–3,5 мас.%), MgO (0,27–0,78 мас.%) и FeO_{tot} (2,52–4,2 мас.%). Таким образом, породы соответствуют группе фельдшпатоидных пород основного состава (табл. 1). Коэффициент агапитности $(Na + K)/Al$ пород первого типа превышает 1 (1,0–1,13; среднее 1,10); второго и третьего типов меняется от 0,83 до 1,01 (среднее 0,9); четвертого от 0,89 до 0,96 (среднее 0,93).

На диаграмме $SiO_2-(Na_2O + K_2O)$ точки составов соответствуют нефелиновым сиенитам (основным фойдолитам и основным фойдитам по [4]) и нефелин-содалитовым кумулатам. На диаграмме Na–Al–K точки составов щелочных пород массива Богдо ложатся на продолжение линий трендов, выявленных для магматических серий массива Nechalacho Layered Suite, возникновение которых объясняется фракционированием расплава [5].

Из четырёх проб пород массива Богдо были выделены зёрна сфена $CaTi[SiO_4]$ для определения U–Pb-возраста с помощью вторично-ионного микрозонда SHRIMP-II в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ [6]. В зёрнах сфена из 2 проб либнеритовых сиенитов содержания урана оказались очень низкими (0,1–1 ppm U). В сфене из двух проб (рисчоррит и ПЛНС) содержания урана варьируют от 3–4 до 13 ppm U. Рассчитанный для 4 проб

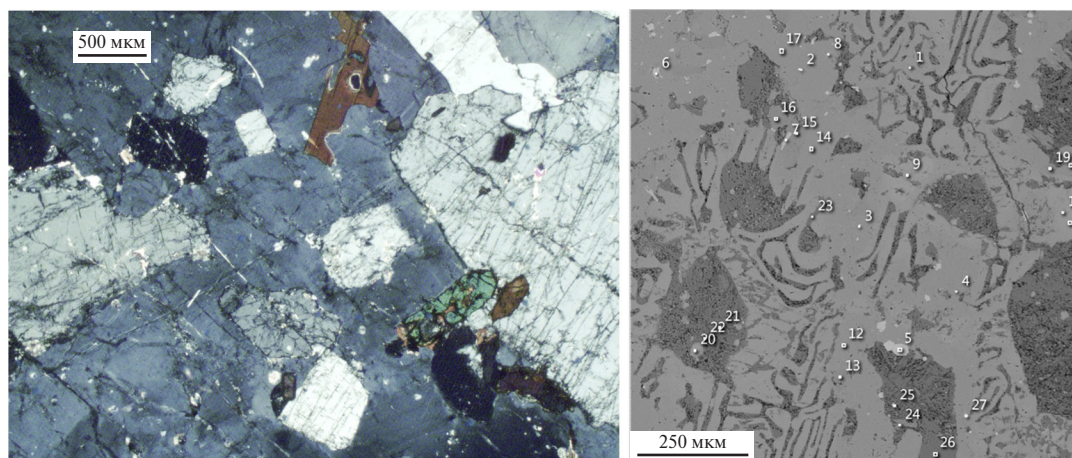


Рис. 2. Микрофотография в скрещенных николях рисchorрита (слева) с пойкилитовой структурой полевого шпата, содержащего включения нефелина, биотита, эгирина и сфена; СЭМ (справа) симплектита (ортоклаз и нефелин) из псевдолейцитового сиенита массива Богдо. На СЭМ точки: 9–12, 14, 17, 18 — ортоклаз; 1, 21–23, 26 — нефелин; 2–3 — магнетит; 4–7, 25, 27 — биотит; 13, 15, 16, 19 — мусковит; 8, 20 — кальцит.

(63 зерна сфена) U–Pb-возраст соответствует $394,4 \pm 3,2$ млн лет (рис. 3), что близко возрастному этапу около 400 млн лет, приведённому выше и обобщёному для Томторского массива [7].

По структурным особенностям (пойкилитовая структура, симплектиты), петрохимическим и минералого-геохимическим данным породы массива Богдо соответствуют рисchorритам, либнеритовым сиенитам и ПЛНС [8, 4]. Эти данные свидетельствуют в пользу представлений о формировании пород на магматической стадии. Проявление карбонатизации щелочных пород со значительным возрастанием содержаний TiO_2 (2,88 мас.%), REE

и редких элементов, с мультиэлементным спектром, близким к томторским карбонатитам, позволяет предположить значительное распространение карбонатитов с редкометалльной и REE-минерализацией в массиве Богдо.

Полученные данные свидетельствуют о средне-девонском времени формирования щелочных магматических пород массива Богдо $394,4 \pm 3,2$ млн лет. Выделенный возрастной рубеж не уникален для истории Сибирского кратона и в полной мере согласуется с эпохой крупнейших проявлений внутриплитного магматизма. В частности, на основании U–Pb- и Ar–Ar-датирования пород массива Томтор сделан вывод о двух этапах его формирования: 701–675 и 414–387 млн лет. Девонский период формирования массива Томтор связывается с воздействием Вилуйского плюма на восточный край Сибирского кратона, что привело к разрывам литосферы и образованию Вилуйской крупной изверженной провинции с радиальной системой рифтов, разломов, дайковых поясов [7, 9]. Кроме того, возраст пород Кольской щелочной провинции соответствует 410–362 млн лет [10], и этот факт требует поисков более общих причин регионального проявления плюмового магматизма девонского возраста. Одной из таких причин может быть влияние периферической зоны (в максимальной мере контролирующей положение LIP и кимберлитов) Africa Large Low Shear Velocity Province (“Tuzo”) в девонскую эпоху на Балтику и Сибирь [11]. Полихронность формирования, подобную Томторской, можно ожидать и для массива Богдо. Глобальное проявление Сибирского суперплюма пермо-триасового возраста, ответственного за бактериально-гидротермальный этап фор-

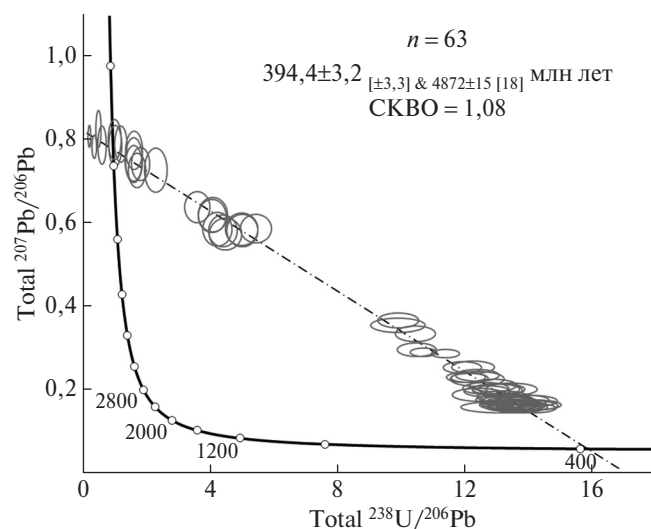


Рис. 3. Результаты U–Pb-датирования методом SHRIMP-II зёрен сфена из четырёх проб щелочных пород (рисchorрит, псевдолейцитовый и либнеритовые нефелиновые сиениты) массива Богдо. Эллипсы ошибок измерений соответствуют 2σ .

Таблица 1. Химический (мас.%) и микроэлементный (ppm) состав рисчорритов (Р), псевдолейцитового сиенита (ПЛС), карбонатизированного габбро-сиенита (КПЛС), крупнозернистого (кр/з) и среднезернистого (ср/з) либнеритового сиенита (ЛС) массива Богдо и рисчоррита Хибинского массива (Р*) (Магматические горные породы, 1983).

№ пробы	Р	Р	Р	ПЛС	КПЛС	ЛС (кр/з)	ЛС (ср/з)	Р*
	bog-15	bog-17	bog-18	bog-1	bog-2	bog-6	bog-14	7
SiO ₂	50,91	49,93	49,05	52,43	45,90	49,28	50,01	51,30
TiO ₂	0,67	0,64	0,61	0,65	2,88	0,45	0,44	1,14
Al ₂ O ₃	22,89	23,65	23,18	21,22	18,18	22,74	21,26	22,30
Fe ₂ O ₃	2,70	2,52	3,21	2,57	5,10	3,49	4,07	4,51
MnO	0,13	0,14	0,16	0,09	0,28	0,18	0,22	0,17
MgO	0,28	0,33	0,33	0,50	1,70	0,73	0,78	0,67
CaO	1,76	1,81	2,10	3,50	7,58	3,22	3,17	1,63
Na ₂ O	7,11	5,76	7,62	3,07	0,42	4,22	4,33	7,48
K ₂ O	10,06	9,93	9,80	10,15	9,93	8,23	7,93	9,86
P ₂ O ₅	0,07	0,08	0,06	0,05	0,33	0,04	0,05	н.д.
BaO	0,77	0,66	0,88	0,24	0,09	1,98	2,02	н.д.
SO ₃	0,49	0,49	0,67	0,08	0,09	0,07	0,10	н.д.
ППП	1,55	3,43	1,33	5,68	7,29	4,56	4,82	н.д.
SUM	99,42	99,37	98,99	100,20	99,77	99,18	99,19	н.д.
Sc	0,56	0,67	0,81	0,35	0,86	0,54	0,72	н.д.
V	59	68	116	100	284	140	168	н.д.
Cr	16,2	13,5	22	5,8	5,2	6,6	13,2	н.д.
Co	1,47	1,07	1,15	0,71	1,18	0,90	1,36	н.д.
Ni	51	<3	4,3	3,0	<3	<3	15,6	н.д.
Cu	7,6	<5	7,4	<5	<5	<5	6,7	н.д.
Zn	65	71	78	44	85	56	83	н.д.
Rb	733	626	588	453	448	113	135	н.д.
Sr	2,1 · 10 ³	1,9 · 10 ³	2,0 · 10 ³	719	1,0 · 10 ³	3,9 · 10 ³	2,7 · 10 ³	н.д.
Y	27	33	50	16,4	56	14,7	22	н.д.
Zr	336	305	465	209	497	433	560	н.д.
Nb	129	137	112	136	495	83	103	н.д.
Mo	3,5	3,8	4,3	1,10	2,6	0,97	0,66	н.д.
Sb	0,48	0,48	0,36	0,27	0,48	0,27	0,36	н.д.
Cs	11,2	7,9	5,8	1,42	0,90	0,30	0,60	н.д.
Ba	5,1 · 10 ³	4,0 · 10 ³	5,5 · 10 ³	2,0 · 10 ³	843	1,5 · 10 ⁴	1,6 · 10 ⁴	н.д.
La	56	55	46	39	122	57	54	н.д.
Ce	80	83	81	68	241	65	61	н.д.
Pr	7,4	7,5	7,1	7,1	26	4,9	4,3	н.д.
Nd	20	22	22	19,3	79	12,1	12,4	н.д.
Sm	2,9	3,3	3,8	2,6	10,5	1,31	2,1	н.д.
Eu	0,97	1,15	1,31	0,79	3,4	0,65	0,89	н.д.
Gd	3,1	3,8	4,1	2,7	10,3	1,55	1,98	н.д.
Tb	0,52	0,63	0,80	0,36	1,59	0,22	0,33	н.д.
Dy	3,5	4,2	5,9	2,3	9,7	1,32	2,2	н.д.
Ho	0,72	0,93	1,38	0,51	1,88	0,30	0,45	н.д.
Er	2,4	3,0	4,8	1,45	5,1	0,92	1,57	н.д.
Tm	0,37	0,51	0,76	0,20	0,64	0,20	0,28	н.д.
Yb	2,2	3,1	4,7	1,02	3,8	1,22	1,97	н.д.
Lu	0,34	0,43	0,64	0,12	0,46	0,21	0,30	н.д.
Hf	5,3	4,4	6,8	3,1	8,5	5,4	0,8	н.д.
Ta	3,6	3,4	2,6	4,6	9,3	1,03	1,23	н.д.
Pb	15,1	10,9	10,7	4,4	6,6	9,7	9,0	н.д.
Th	6,0	14,5	6,5	1,84	3,3	2,1	2,3	н.д.
U	2,9	3,0	3,2	0,93	1,11	2,6	2,7	н.д.
Au	0,03	0,02	0,01	0,08	0,004	0,01	0,01	н.д.
Ag	0,03	0,02	0,04	0,08	0,004	0,01	0,01	н.д.

Примечание. ППП — потери при прокаливании, н.д. — нет данных. Аналитические работы выполнялись в АЦМЭИИ ИГМ СО РАН. Определение окислов проводилось РФА методом на спектрометре ARL-9900XP, “Thermo Fisher Scientific” (ИГМ СО РАН, аналитик Н.Г. Карманова) с применением программы QuantAS. Препараты для анализа готовили путём сплавления (1:9) пробы с флюсом на основе смеси тетрабората и метабората лития. Пределы обнаружения элементов составили 0,001–0,1%; содержания микроэлементов определены на приборе ELEMENT фирмы “Finnigan MAT” (аналитики И.В. Николаева, С.В. Палесский). Подготовка проб осуществлялась сплавлением с метаборатом лития; пределы обнаружения 10⁻⁷–10⁻⁹%; содержания Au и Ag определены химико-атомно-абсорбционным методом на приборе Solar M6 (“Thermo Electron Corporation”) с Зеемановской и дейтериевой коррекцией фона, с пределами обнаружения 10⁻⁷% (аналитик В.Н. Ильина). Р* — по [4].

мирования Томторских руд [12], должно быть также подтверждено минеральными ассоциациями и изотопными характеристиками в породах массива Богдо.

Источники финансирования. Работа поддержана РФФИ (грант 05–18–70109_Арктика) и Министерством науки и высшего образования РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайцев А.И., Энтин А.Р., Ненашев Н.И., Лазебник К.А., Тянь О.А. Геохронология и изотопная геология Якутии. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1992. 248 с.
2. Толстов А.В., Тянь О.А. Геология и рудоносность массива Томтор. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1999. 164 с.
3. Охлопков В.И. Отчет о групповой геологической съёмке по работам Верхне-Уджинского объекта Анабарской партии. Амакинская ГРЭ. 1987.
4. Магматические горные породы. Классификация, номенклатура, петрография. Ч. 2 / Гл. ред. О.А. Богатиков. М.: Наука, 1983. 767 с.
5. Moller V., Williams-Jones A.T. // J. Petrology. 2016. V. 57. P. 229–276. doi.org/10.1093/petrology/egw003
6. Rodionov N.V., Lepekhina E.N., Antonov A.V., et al. // Russian Geology and Geophysics. 2018. V. 59. P. 962–974. doi.org/10.1016/j.rgg.2018.07.016
7. Владыкин Н.В., Котов А.Б., Борисенко А.С., Ярмолюк В.В., Похиленко Н.П., Сальникова Е.Б., Травин А.В., Яковлева С.З. // ДАН. 2014. Т. 454. № 2. С. 195–199. DOI: 10.7868/S0869565214020224.
8. Заварицкий А.Н. Изверженные горные породы. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 479 с.
9. Kiselev A.I., Ernst R.E., Yarmolyuk V.V., Egorov K.N. // J. Asian Earth Sci. 2012. V. 45. P. 1–16. DOI: 10.1016/j.jseaes.2011.09.004
10. Kramm U., Sindern S. In: Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: The Key Example of the Kola Alkaline Province. Eds F. Wall, A.N. Zaitsev // Mineralogical Society Series. 2004. V. 10. P. 75–97.
11. Torsvik T.H., Burke K., Steinberger B., Webb S.J., Ashwal L.D. // Nature. 2010. V. 466. P. 352–355. DOI: 10.1038/nature09216
12. Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Добрецов Н.Л., Толстов А.В., Щербов Б.Л., Карманов Н.С., Герасимов Е.Ю., Брянская А.В. // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 6. С. 1080–1115. DOI: 10.15372/GiG20150603.

U–Pb AGE OF SPHENE GRAINS, PETROCHEMICAL, MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL FEATURES OF ALKALINE ROCKS OF THE BOGDO COMPLEX (ARCTIC SIBERIA)

Academician of the RAS N. L. Dobretsov¹, S. M. Zhmodik^{1,2}, E. V. Lazareva¹,
A. V. Tolstov^{1,3}, D. K. Belyanin^{1,2}, O. N. Surkov¹, N. N. Dobretsov¹,
N. V. Rodionov⁴, S. A. Sergeev⁴

¹Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

³Research and Development Exploration Enterprise AK ALROSA, Mirny, Republic of Sakha Yakutia, Russian Federation

⁴A.P. Karpinsky Russian Geology Research Institute, Saint-Petersburg, Russian Federation

Received August 21, 2019

In the north of the Siberian Platform, east of the Anabar Shield, several identified massifs of alkaline rocks with carbonatites are known: Tomtorsky, Bogdo, Promezhutochniy, as well as Bualkalakh, Chuempe, Uele, which are projected according to geophysical data and forming a large alkaline-carbonatite province. The first data on the composition of alkaline rocks of the Bogdo massif were obtained, which correspond to a group of feldspathic rocks of the main composition: rischorrites, biotite-aegirine libenerite syenites, carbonatized, with symplectites and nepheline-feldspar aggregates, pseudo-leucite nepheline syenites. Sphenes were extracted from various types of rocks of the Bogdo massif and their U–Pb age was determined using the SHRIMP-II secondary-ion microprobe. The calculated U–Pb age corresponds to $394,4 \pm 3,2$ Ma, which is close to the age stage established for the Tomtor massif and the age of the rocks of the Kola alkaline province. One of the reasons for the manifestation of alkaline plume magmatism in this territory may be the influence of the peripheral zone Africa Large Low Shear Velocity Province (“Tuzo”) in the Baltic and Siberia during the Devonian era.

Keywords: feldspathic rocks, Bogdo massif, rischorrites, libenerite and pseudoleucite syenites, U–Pb age, sphene, Arctic Siberia.