

УДК 552.3:550.4:550.42:550.93

АБСОЛЮТНЫЙ ВОЗРАСТ, ПЕТРОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И РУДОНОСНОСТЬ ТОЧИЛЬНОГО ШТОКА ГОРНОГО АЛТАЯ

Гусев Анатолий Иванович¹,
anzerg@mail.ru

Гусев Николай Иванович²,
Nicolay_Gusev@mail.ru

Табакаева Евгения Михайловна¹,
tabakaeva16@mail.ru

¹ Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В.М. Шукшина, Россия, 659300, г. Бийск, ул. Владимира Короленко, 53.

² Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Средний проспект, 74.

Актуальность проведенных исследований определяется необходимостью уточнения абсолютного возраста и изучения петрологии, геохимии и оруденения гранитоидов Точильного штока Горного Алтая, который представлен сильно фракционированными разностями от меланосиенита до лейкогранита. С ними пространственно и парагенетически связаны различные типы оруденения: редкометалльные пегматиты и ювелирно-поделочное сырьё.

Цель исследования: определить абсолютный возраст и изучить петрологические, геохимические особенности пород и оруденения Точильного штока с использованием экспериментальных диаграмм, позволяющих выявлять генетические проблемы и физико-химические особенности петрогенезиса.

Методы исследований включали изучение состава горных пород с применением лазерно-абляционного анализа методом индуктивно-связанной плазмы на спектрометре «OPTIMA 4300» с высокой чувствительностью определения элементов в Лабораториях Всероссийского научно-исследовательского геологического института (г. Санкт-Петербург) и Объединённого института геологии и геофизики Сибирского отделения РАН (г. Новосибирск). Определение абсолютного возраста пород выполнено U-Pb методом SIMS (ионный микрозонд SHRIMP-II по циркону).

Результаты. Приведены данные по определению абсолютного возраста, геохимии и петрологии гранитоидов Точильного штока и его рудоносности. В пределах последнего выявлены меланосиениты, сиениты, гранит-порфиры, лейкограниты. Формирование штока отвечает пролонгированному периоду в 24 млн лет (от 238 до 262 млн лет). Такой длительный период формирования обусловил совмещение в одном штоке дериватов высоко-калиевой шошонитовой серии пород и высоко-K адакито-подобных разностей. По соотношениям Nb/Ta в породах предполагается плавление амфибол-содержащего источника, отвечающего высоко-Nb базальтам (NEB) утолщённой нижней коры. Эта субконтинентальная литосферная мантия, преобразованная базальтоидными магмами, образовавшимися при плавлении субдуцированной океанической литосферы, была трансформирована под воздействием плюмового источника. Редкометалльные пегматиты, связанные с гранитоидами Точильного штока, относятся к семейству Nb>Ta-Y-F (NYF). По геохимическим данным пегматиты относятся к редкоземельному классу (REE), обогащённому Zr, Ta, Nb. В сиенитах проявлен тетрадный эффект фракционирования P3Э M-типа.

Ключевые слова:

Геохимия, петрология, меланосиениты, сиениты, гранит-порфиры, лейкограниты, циркон, абсолютный возраст, редкометалльные пегматиты, тетрадный эффект фракционирования P3Э.

Геологическое строение точильного штока

Точильный шток располагается к северу от Белокурихинского плутона и включает в себя разрозненные выходы гранитоидов, обнажающихся в низовьях рек Песчаной и Даниловки, которым отвечает гравитационный минимум площадью 85 км². Указанный минимум имеет овальную форму, вытянутую в субмеридиональном направлении. Ранее этот шток считался лейкогранитовым по составу и рассматривался в составе Белокурихинского комплекса с возрастом поздняя пермь – ранний триас [1]. Более детальное изучение выходов штока показало, что в обнажающихся фрагментах кроме лейкогранитов имеются меланосиениты, сиениты и гранит-порфиры. Кроме того, установлено, что в пределах ареала значительным распространением пользуются редкометалльные пегматиты, а в дифференцированных разностях по-

следних отмечается ювелирно-поделочное сырьё: горный хрусталь, раухтопаз, аметист, зелёный турмалин.

В целом по взаимоотношениям породных типов в составе Точильного штока выделяются 3 фазы внедрения: 1 – меланосиениты, сиениты и кварцевые сиениты, 2 – гранит-порфиры, 3 – лейкограниты. В распределении породных типов разных фаз в нескольких фрагментах Точильного ареала устанавливается зональность, относящаяся к обратному типу, в котором более эволюционированные фазы (граниты, лейкограниты) локализируются по периферии массивов, а в центре – менее эволюционированные – породы первых фаз внедрения (меланосиениты, сиениты); контакты между фазами дисконкордантные или со слабо конкордантными текстурами и переходами. Характер зональности плутонов интерпретируется как результат химиче-

ской дифференциации в глубинном очаге и скорости поступления последовательных фаз. В случае быстрого поступления фаз и отдельных пульсаций предыдущие дифференциаты не успевают закристаллизоваться и более поздние фазы их легко прорывают и располагаются в центре плутонов с формированием нормальной зональности. И наоборот, когда скорость становления массивов малая, то предыдущие фазы внедрения успевают закристаллизоваться, и тогда более поздние дифференциаты внедряются на периферию плутонов с образованием обратной зональности [2], что и имеет место в отдельных фрагментах выходов гранитоидов Точильного ареала. Кроме того, замечено, что наиболее эволюционированные породные фазы во фрагментах Точильного штока образуют куполовидные выступы и располагаются на более высоких отметках по вертикали, чем ранние дифференциаты.

Петрографическая характеристика пород

Меланосиениты серой, розовато-серой окраски, крупнокристаллические. Они сложены калинатровым полевым шпатом (35–45 %), амфиболом феррогастингситового ряда ($f=49–62$ %) (20–22 %), редко биотитом (2–3 %), а в интерстициях указанных минералов содержат плагиоклаз и кварц (2–4 %). Плагиоклаз представлен анортитом (№ 42–48). По периферии окружён каёмкой олигоклаза. Акцессорные минералы представлены (г/т) магнетитом (4950), апатитом (65) и цирконом (25). Они характеризуются высокой щелочностью ($K_2O=7,2$ %, $Na_2O=3,62$ %), титанистостью (1,4 % TiO_2) и фосфористостью (0,33 % P_2O_5), высоким содержанием (г/т) бария (1850), стронция (3450), циркония (330), ниобия (8,5), скандия (9), урана (5,5), кобальта (7,5), никеля (12,3) и тория (9,1).

Сиениты, реже кварцевые сиениты, представляют собой красновато-серые крупно-среднезернистые массивные породы. Это порфировидные магматиты (во вкрапленниках плагиоклаз 1 генерации и пироксен). Структура основной ткани породы гипидиоморфнозернистая с заметным идиоморфизмом плагиоклаза, пироксена и роговой обманки. Они состоят из крупнопертитового калинатрового полевого шпата (42–50 %), клинопироксена (диопсида – 15 %), амфибола (от 5 до 11 %) паргасит-феррогастингситового ряда ($f=45–55$ %), биотита (от 1 до 3 %) истонит-сидерофиллитового ряда, мусковита (от 1 до 5 %). В группе акцессориев присутствуют: сфен (до 1 %) и магнетит (1120 г/т), редко салит ($f=32–36$ %). Плагиоклаз 1 генерации зонален с анортитом (№ 40–42) в ядре и олигоклазом (№ 19–21) по периферии. Нередко соссюритизирован. Плагиоклаз основной ткани породы сложен олигоклазом (№ 25–27), он менее изменён, чем плагиоклаз вкрапленников. Диопсид местами тремолитизирован, а роговая обманка и биотит – хлоритизированы.

Гранит-порфиры биотитовые – среднезернистые, светло-серой окраски, местами с розоватым оттенком. Структура порфировая, а основной тка-

ни – гипидиоморфнозернистая, редко – микропегматитовая. Состав (%): кварц (30–35), микроклин (28–42), плагиоклаз (20–22), биотит (5–7), мусковит (1–2). Акцессорные минералы – магнетит, апатит, циркон, редко – сфен. Плагиоклаз зонален. В ядре таких выделений кристаллизовался олигоклаз (№ 26–28) до андезина (№ 32), а по периферии – альбит. Биотит в виде чешуек и копьевидных выделений относится к маложелезистой разновидности ($f=40–42$), по периферии нередко окружён мусковитом. Плагиоклаз в виде призматических выделений нередко отмечается внутри порфировых индивидов микроклина. Изредка в гранит-порфирах отмечаются миаролы с горным хрусталём и турмалином.

Лейкограниты двуслюдяные, нередко – миароловые. Это светло-серые изредка с розоватым оттенком породы, являющиеся главной фазой. Структура их гипидиоморфнозернистая, местами – аплитовидная. Состав (%): кварц – 34–40, микроклин (27–41), плагиоклаз – 10–14, биотит и мусковит – 1–4. Плагиоклаз обладает идиоморфными выделениями. А кварц и микроклин – ксеноморфны. Микроклин чаще бесструктурный и редко имеет решетчатую микроструктуру. Плагиоклаз зонален. В ядре определяется как андезин (№ 32–34), а в периферических каёмках – как альбит-олигоклаз. Ядерная зона плагиоклаза часто замещается агрегатом пелита, хлорита, серицита, кварца. Чешуйчатый биотит содержит включения акцессориев: магнетита, апатита, циркона, сфена. Мусковит кристаллизовался позднее биотита. Он образует самостоятельные выделения и корродирует биотит. В миаролах присутствуют турмалин, горный хрусталь, амethyst.

Определение абсолютного возраста гранитов штока

Первое определение абсолютного возраста для пегматитов Точильного штока Ar-Ar-методом по мусковиту выполнено группой авторов [3]. По данным $^{40}Ar-^{39}Ar$ абсолютный возраст составил 247 ± 3 млн лет.

Авторами выполнено определение абсолютного возраста U-Pb-методом по циркону для гранит-порфиров на основании 10 зёрен циркона. Преобладающая форма кристаллов циркона призматическая. Все зёрна характеризуются зональным строением, подчёркиваемым чередованием светлых и тёмных полос. Католюминесцентные изображения цирконов и «кратеров» замеров приведены на рис. 1–4.

Соотношения изотопов Pb, U, Th и полученные абсолютные возраста приведены в табл. 1. Возрастной интервал значений весьма широкий – от 238 до 262 млн лет.

Петрогеохимические особенности породных типов штока

Представительные анализы породных типов Точильного штока приведены в табл. 2. U/Th отношения в породах Точильного штока менее 1, что

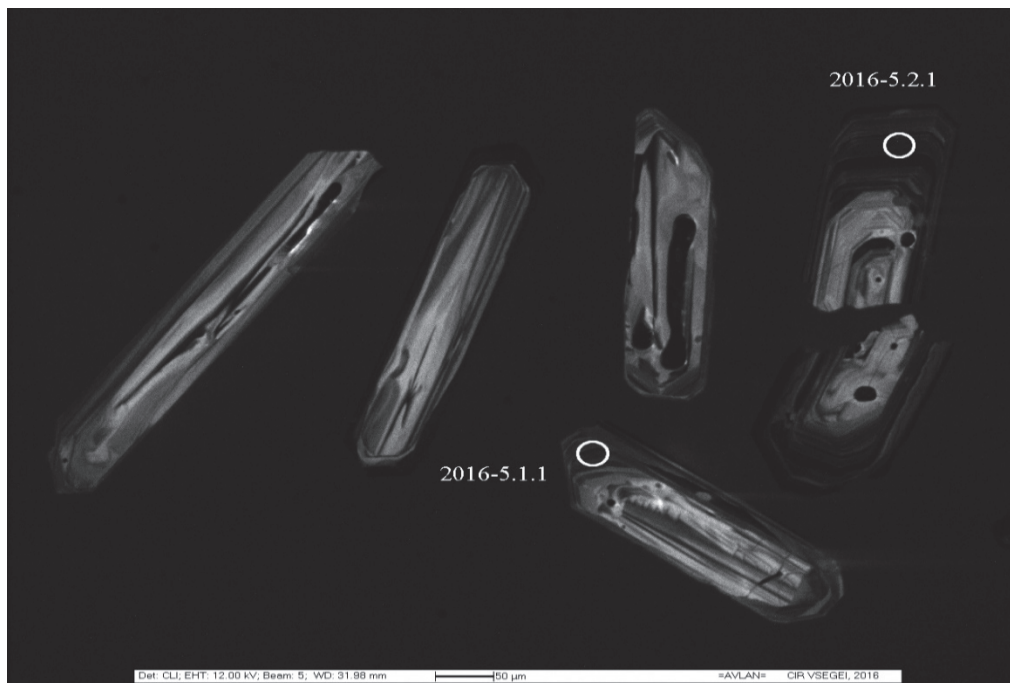


Рис. 1. Катодолюминесцентные изображения цирконов из образца гранит-порфиров (проба 2016–5, замеры 1.1 и 2.1)

Fig. 1. Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons from the granite-porphyre sample (probe 2016–5, measures 1.1 and 2.1)

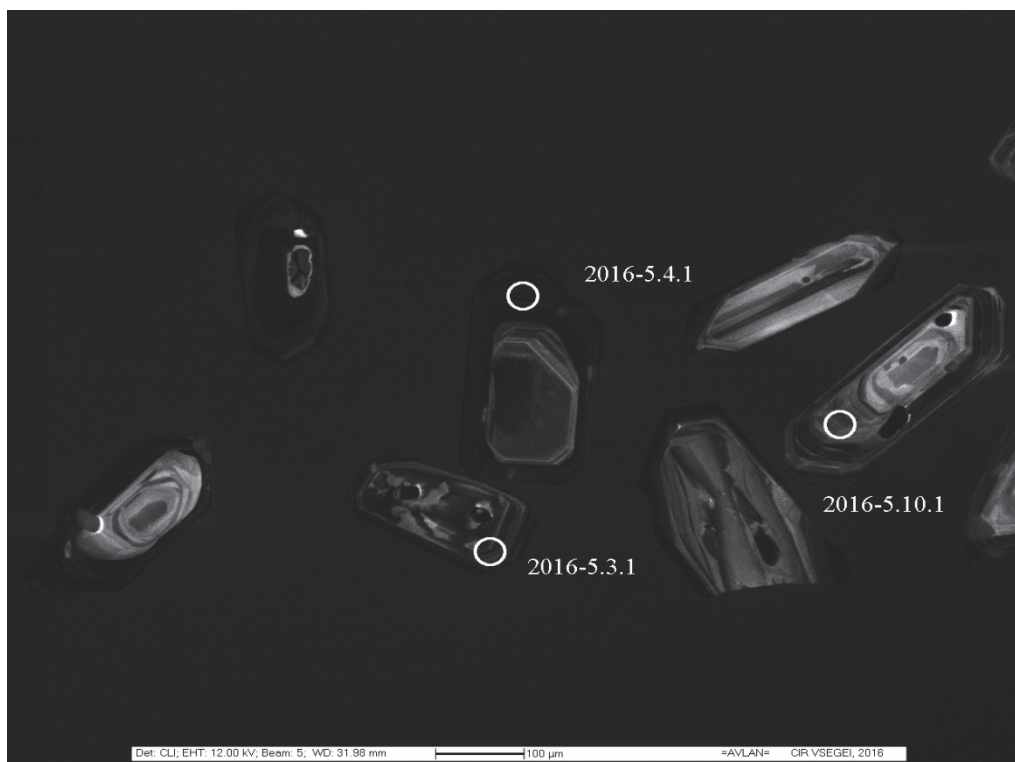


Рис. 2. Катодолюминесцентные изображения цирконов из образца гранит-порфиров (проба 2016–5, замеры 3.1, 4.1 и 10.1)

Fig. 2. Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons from the granite-porphyre sample (probe 2016–5, measures 3.1, 4.1 and 10.1)



Рис. 3. Католюминесцентные изображения цирконов из образца гранит-порфиров (проба 2016–5, замеры 5.1, 6.1 и 7.1)

Fig. 3. Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons from the granite-porphyre sample (probe 2016–5, measures 5.1, 6.1 and 7.1)

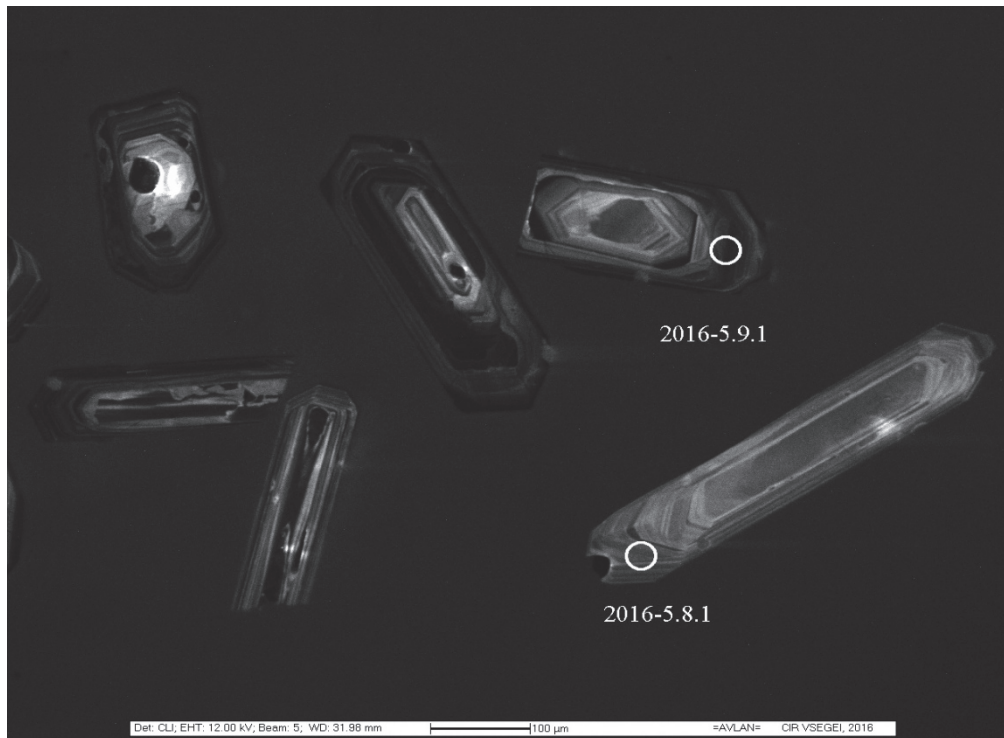


Рис. 4. Католюминесцентные изображения цирконов из образца гранит-порфиров (проба 2016–5, замеры 8.1 и 9.1)

Fig. 4. Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons from the granite-porphyre sample (probe 2016–5, measures 8.1 and 9.1)

Таблица 1. Изотопный состав Pb, U, Th в цирконах гранит-порфиров Точильного штока и абсолютные возраста

Table 1. Isotope composition of Pb, U, Th in zircons of granite-porphyrates of Tochilny stock and absolute ages

| Точки замеров Points of tests | ²⁰⁶ Pb _c | U, г/т (g/t) | ²³² Th ²³⁸ U | ²⁰⁶ Pb* | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ Возраст, млн лет/Age, million years | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ Возраст/Age | $\frac{^{238}\text{U}}{^{206}\text{Pb}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$ |
|----------------------------------|--------------------------------|-----------------|---------------------------------------|--------------------|---|--|--|---|
| 6.1 | 0,8 | 423 | 0,45 | 13,8 | 238,1±3 | 383±140 | 26,58±1,3 | 0,0543±6 |
| 7.1 | 2,82 | 1132 | 0,52 | 38,5 | 243,3±2,8 | 235±230 | 26±1,2 | 0,0509±10 |
| 3.1 | 0,55 | 1090 | 0,34 | 37 | 248,6±2,6 | 299±88 | 25,43±1,1 | 0,0523±3,9 |
| 1.1 | 0,20 | 517 | 0,39 | 17,5 | 249,3±2,9 | 218±72 | 25,36±1,2 | 0,0505±3,1 |
| 4.1 | 1,14 | 1767 | 0,35 | 61,7 | 254,0±2,6 | 272±100 | 24,89±1,1 | 0,0517±4,5 |
| 8.1 | 0,00 | 277 | 0,44 | 9,69 | 256,9±3,3 | 195±77 | 24,6±1,3 | 0,0500±3,3 |
| 10.1 | 0,13 | 744 | 0,29 | 26,1 | 257,3±2,8 | 244±55 | 24,56±1,1 | 0,0511±2,4 |
| 2.1 | 0,11 | 1226 | 0,40 | 43,2 | 259,0±2,7 | 250±44 | 24,4±1,0 | 0,0512±1,9 |
| 9.1 | 0,22 | 1340 | 0,26 | 47,3 | 259,1±2,7 | 283±49 | 24,38±1,1 | 0,0519±2,1 |
| 5.1 | 0,50 | 1544 | 0,34 | 55,3 | 262,1±2,7 | 219±68 | 24,09±1,0 | 0,0505±2,9 |

Примечание. Ошибки составляют 1-сигма. Pb_c и Pb* указывают на обычную и радиогенную части свинца, соответственно. Общий Pb скорректирован с использованием измеренного изотопа ²⁰⁴Pb.

Note. Errors are 1-sigma; Pb_c and Pb* indicate the common and radiogenic portions, respectively. Sum Pb is corrected using the measured ²⁰⁴Pb.

Таблица 2. Химические составы пород Точильного штока

Table 2. Chemical composition of rocks of Tochilny stock

| Компоненты/Components | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------------------------|------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| SiO ₂ | 57,2 | 62,3 | 62,5 | 72,5 | 72,9 | 74,1 | 74,4 | 73,8 | 77,0 | 77,18 |
| TiO ₂ | 1,4 | 0,16 | 0,7 | 0,41 | 0,15 | 0,14 | 0,15 | 0,15 | 0,017 | 0,09 |
| Al ₂ O ₃ | 17,1 | 21,1 | 17,8 | 14,4 | 15,5 | 14,6 | 14,5 | 14,6 | 13,7 | 12,56 |
| Fe ₂ O ₃ | 7,1 | 1,4 | 3,1 | 1,84 | 1,22 | 1,14 | 1,2 | 1,28 | 0,23 | 0,99 |
| MnO | 0,16 | 0,035 | 0,09 | 0,055 | 0,035 | 0,03 | 0,05 | 0,078 | 0,018 | 0,03 |
| MgO | 1,4 | 0,37 | 0,81 | 0,5 | 0,36 | 0,21 | 0,22 | 0,25 | <0,1 | 0,13 |
| CaO | 3,6 | 1,14 | 1,95 | 1,62 | 1,18 | 1,05 | 1,0 | 1,12 | 0,31 | 0,45 |
| Na ₂ O | 3,62 | 5,42 | 4,35 | 2,88 | 3,04 | 3,02 | 3,5 | 2,93 | 4,46 | 2,08 |
| K ₂ O | 7,2 | 6,97 | 7,31 | 5,07 | 4,91 | 5,19 | 5,2 | 5,06 | 4,0 | 5,84 |
| P ₂ O ₅ | 0,33 | 0,1 | 0,12 | 0,1 | 0,074 | 0,076 | 0,08 | 0,093 | <0,5 | 0,54 |
| П.п.п. | 1,0 | 1,05 | 0,9 | 0,49 | 0,71 | 0,62 | 0,5 | 0,69 | 0,36 | 0,03 |
| Сумма/Sum | 99,8 | 100 | 99,9 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 99,92 |
| Li | 19,1 | 126 | 65,7 | 187 | 108 | 106 | 110 | 107 | 25,2 | 60,5 |
| Cs | 12,5 | 37,9 | 38,1 | 18 | 17,5 | 20,6 | 16,8 | 20,6 | 9,21 | 6,30 |
| Rb | 120 | 422 | 187 | 257 | 206 | 211 | 215 | 197 | 229 | 240 |
| Sr | 3450 | 125 | 155 | 182 | 102 | 98,5 | 101 | 106 | 13,6 | 15 |
| Ba | 1850 | 355 | 404 | 420 | 292 | 290 | 280 | 290 | 6,75 | 5,50 |
| La | 22,3 | 39,9 | 45,8 | 47,2 | 28 | 31,9 | 28,4 | 33,9 | 9,99 | 4,30 |
| Ce | 55,4 | 81,3 | 59,7 | 99,4 | 59,5 | 65,9 | 58,6 | 68,9 | 25,3 | 8,48 |
| Pr | 5,3 | 9,39 | 10,1 | 10,9 | 6,8 | 7,57 | 6,75 | 7,87 | 3,38 | 0,99 |
| Nd | 24,6 | 34,3 | 25,2 | 40,2 | 24,6 | 26,9 | 23,8 | 28,9 | 12,8 | 3,61 |
| Sm | 6,1 | 6,88 | 6,6 | 7,45 | 4,71 | 5,33 | 5,05 | 6,33 | 4,49 | 0,75 |
| Eu | 1,5 | 0,59 | 1,2 | 1,01 | 0,45 | 0,53 | 0,58 | 0,55 | 0,058 | 0,07 |
| Gd | 6,4 | 5,5 | 6,7 | 5,59 | 4,07 | 4,75 | 3,88 | 4,78 | 4,16 | 0,73 |
| Tb | 1,1 | 0,7 | 1,2 | 0,79 | 0,54 | 0,56 | 0,53 | 0,58 | 0,75 | 0,13 |
| Dy | 5,0 | 3,11 | 5,0 | 4,17 | 2,32 | 2,7 | 2,77 | 2,75 | 4,78 | 0,75 |
| Ho | 0,48 | 0,53 | 0,6 | 0,81 | 0,39 | 0,54 | 0,47 | 0,54 | 1,1 | 0,17 |
| Er | 1,5 | 1,35 | 1,4 | 2,37 | 1,08 | 1,41 | 1,17 | 1,43 | 3,24 | 0,63 |
| Tm | 0,6 | 0,19 | 0,4 | 0,35 | 0,14 | 0,18 | 0,17 | 0,19 | 0,58 | 0,13 |
| Yb | 3,3 | 1,44 | 3,1 | 2,3 | 0,94 | 1,06 | 1,13 | 1,16 | 3,86 | 1,01 |
| Lu | 0,6 | 0,18 | 0,5 | 0,37 | 0,14 | 0,18 | 0,14 | 0,18 | 0,66 | 0,17 |
| Y | 20,1 | 16,1 | 19,2 | 22,9 | 12,9 | 15,2 | 15,5 | 16,2 | 30 | 4,7 |
| Zr | 330 | 114 | 245 | 216 | 97,2 | 105 | 94,8 | 109 | 49,4 | 44,0 |
| Nb | 6,5 | 15,9 | 19,2 | 17,7 | 11,9 | 13 | 12,5 | 14 | 42 | 15,0 |
| Hf | 5,1 | 3,39 | 11,1 | 6,01 | 2,91 | 3,52 | 2,77 | 3,6 | 4,06 | 2,60 |
| Ta | 0,7 | 2,81 | 1,4 | 1,95 | 1,78 | 2,28 | 2,26 | 2,31 | 9,3 | 2,20 |

Окончание табл. 2

Table 2.

| Компоненты/Components | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Th | 9,1 | 23,1 | 18,6 | 25,5 | 17,2 | 17,8 | 17,1 | 17,9 | 14,3 | – |
| U | 5,5 | 8,63 | 4,62 | 3,77 | 9,5 | 4,6 | 4,77 | 4,5 | 8,61 | – |
| Sc | 9,0 | 5,11 | – | 5,74 | 4 | 4,04 | – | 3,95 | 2,77 | – |
| Co | 2,5 | 1,28 | – | 3,42 | 1,16 | 1,38 | – | 2,15 | <0,5 | – |
| Ni | 2,3 | 1,83 | 2,0 | 3,06 | 2,17 | 2,13 | 2,2 | 2,58 | 2,09 | 2,1 |
| Cu | 74,3 | 66,6 | – | 2,48 | 6,81 | 3,53 | – | 2,78 | 7,49 | – |
| Zn | 58,9 | 56,2 | – | 61,8 | 45,9 | 41 | – | 45 | 5,35 | – |
| Ag | 0,2 | 0,2 | – | 0,043 | 0,086 | 0,075 | – | 0,076 | 0,15 | – |
| Sb | – | <0,1 | – | <0,1 | <0,1 | <0,1 | – | <0,1 | <0,1 | – |
| Pb | 56,8 | 33,9 | – | 31,4 | 33,7 | 34,1 | – | 34,4 | 34,1 | – |
| Be | 2,9 | 12,7 | – | 4,05 | 2,71 | 2,5 | – | 4,6 | 3,39 | – |
| V | 9,8 | 8,45 | – | 26,5 | 6,24 | 634 | – | 7,17 | <2,5 | – |
| Cr | 6,6 | 5,6 | 6,0 | 22,2 | 17,9 | 17,3 | 15,7 | 13,2 | 43,9 | – |
| Ga | 24,8 | 26,1 | – | 19,0 | 15,9 | 16 | – | 17,8 | 17,4 | – |
| Mo | – | <0,6 | – | 2,03 | 1,89 | 1,9 | – | 1,9 | 5,36 | – |
| Sn | – | 15,3 | 12,8 | 5,86 | 5,78 | 5,33 | 5,5 | 5,33 | 2,36 | – |
| Ru | – | <0,002 | – | <0,002 | <0,002 | <0,002 | – | <0,002 | <0,002 | – |
| Rh | – | <0,002 | – | <0,002 | <0,002 | <0,002 | – | <0,002 | <0,002 | – |
| Pd | – | 0,0067 | – | 0,0059 | 0,0034 | 0,0056 | – | <0,002 | <0,002 | – |
| Ir | – | <0,002 | – | <0,002 | <0,002 | <0,002 | – | <0,002 | <0,002 | – |
| Pt | – | <0,002 | – | 0,0051 | <0,002 | <0,002 | – | <0,002 | <0,002 | – |
| Au | – | 0,0032 | – | <0,002 | <0,002 | <0,002 | – | 0,002 | 0,0087 | – |
| U/Th | 0,6 | 0,37 | 0,25 | 0,15 | 0,55 | 0,26 | 0,28 | 0,25 | 0,6 | – |
| Th/U | 1,65 | 2,68 | 4,03 | 6,76 | 1,81 | 3,87 | 3,58 | 3,98 | 1,66 | – |
| (La/Yb) _N | 4,5 | 18,3 | 9,8 | 13,6 | 19,7 | 19,9 | 16,6 | 19,3 | 1,7 | 4,40 |
| Eu/Eu* | 0,73 | 0,29 | 0,55 | 0,46 | 0,31 | 0,32 | 0,39 | 0,3 | 0,04 | 0,53 |
| ΣP3Э/ΣREE | 154,3 | 201,46 | 186,7 | 245,81 | 146,58 | 164,71 | 148,94 | 174,26 | 108,15 | 26,23 |
| Sr/Y | 171,6 | 7,8 | 8,1 | 7,9 | 7,9 | 6,5 | 6,5 | 6,5 | 0,45 | 3,2 |
| La/Yb | 6,8 | 27,7 | 14,8 | 20,5 | 29,8 | 30,1 | 25,1 | 29,2 | 2,6 | 4,3 |
| TE _{1,3} | 1,09 | 1,0 | 1,18 | 1,0 | 1,03 | 0,96 | 1,03 | 0,95 | 1,06 | 1,0 |
| Nb/Ta | 9,3 | 5,7 | 13,7 | 9,1 | 6,7 | 5,7 | 5,5 | 6,1 | 4,5 | 6,8 |

Примечание. 1 – меланосиенит роговообманковый; 2, 3 – сиениты; 4, 5 – двуслюдяные гранит-порфиры; 6, 7 – двуслюдяные лейкограниты с турмалином; 8 – двуслюдяной лейкогранит с миаролами; 9 – лейкогранит мусковитовый (дайка); 10 – лейкогранит. «–» – анализ не проводился. Нормализация осуществлена по хондриту [4].

Note. 1 – melanosyenite hornblende; 2, 3 – syenites; 4, 5 – two micas granite-porphyre; 6, 7 – two-mica leucogranite with tourmaline; 8 – two-mica leucogranite with miarolitic; 9 – muscovitic leucogranite; 10 – leucogranite. «–» – were not analyzed. Normalized by hondrite [4].

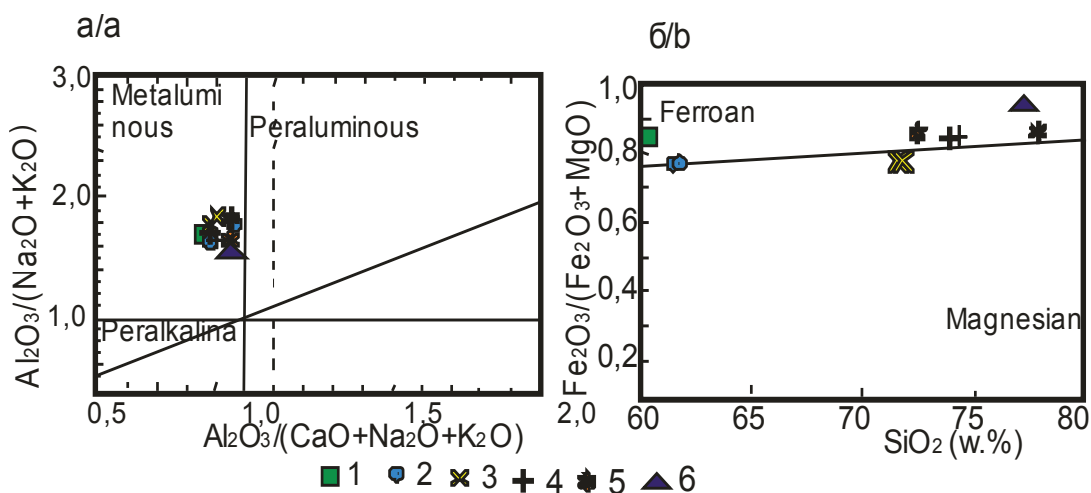


Рис. 5. Диаграммы $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O) - Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ (а) по [5] и $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+MgO) - SiO_2$ (б) по [6] для пород Точильного штока. 1 – меланосиенит, 2 – сиениты, 3 – двуслюдяные гранит-порфиры, 4 – двуслюдяные лейкограниты с турмалином, 5 – лейкограниты с миаролами, 6 – лейкогранит мусковитовый (дайка)

Fig. 5. Classification plots a) $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O) - Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ after [5]; b) $SiO_2 - Fe_2O_3/(Fe_2O_3+MgO)$ after [6] for rocks of Tochilny stock. 1 – melanosyenite, 2 – syenites, 3 – two-mica granite-porphyre, 4 – two-mica leucogranites with tourmaline, 5 – leucogranites with miarolitic, 6 – leucogranite (dike)

указывает на относительно неизменённый их состав и отсутствие наложенных процессов. Сумма РЗЭ в ранних фазах несколько выше, чем в поздних дериватах. Содержания платиноидов и золота в породах или ниже чувствительности анализа, или слабо превышают его. Значимая величина тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ М-типа выявлена только в одной пробе сиенита (1,16).

принадлежности пород и железистому, и магниальному типам (рис. 5, б).

На дискриминационных диаграммах составы пород Точильного ареала тяготеют к разным полям (рис. 6).

Породы ранних фаз или попадают в поле железистых сиенитов, или близки к нему (рис. 6, а, б). Более поздние дериваты попадают в поле щелочных гранитов и риолитов (рис. 6, а, б).

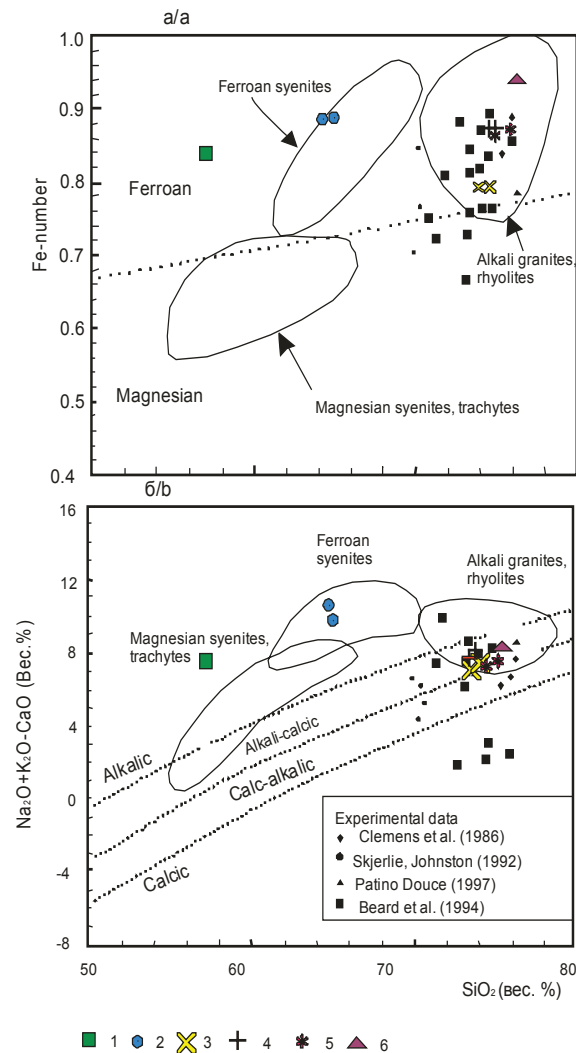


Рис. 6. Дискриминационные диаграммы: а) коэффициент железистости $[\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})] - \text{SiO}_2$; б) $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}) - \text{SiO}_2$ по [7], показывающие классификацию щелочных гранитов и риолитов, железистых сиенитов и магниальных сиенитов и трахитов. Экспериментальные данные по [8–11]. Остальные условные обозначения – на рис. 5

Fig. 6. a) Fe-number $[\text{FeO}/(\text{total FeO} + \text{MgO})] - \text{SiO}_2$; б) $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}) - \text{SiO}_2$ discrimination diagrams after [7], showing the classification of the alkali granite and rhyolite, ferroan syenite and magnesian syenite, and trachyte. The experimental data are from [8–11]. Legend is in Fig. 5

По соотношениям некоторых главных компонентов породные типы Точильного штока относятся к металюминиевому типу (рис. 5, а). Железисто-магниальные показатели свидетельствуют о

Рудоносность гранитоидов Точильного ареала

Характерной особенностью выходов гранитоидов Точильного ареала является рудоносность самих породных типов и наличие пегматитовых тел. Миароловые граниты развиты во всех коренных выходах пород и повсеместно содержат редкие единичные кристаллики или щёточки и сростания раухтопаза, турмалина, амethysta.

Проявление пегматитов Точильное находится в пределах одноименного штока лейкогранитов Точильного ареала. В Точильном штоке выделяются миароловые граниты, в которых миаролы выполнены кварцем, турмалином (шерл), редко – зелёной прозрачной разновидностью турмалина – верделитом, раухтопазом, алмандином. Местами отмечаются сплошные миаролиты. В западной части штока проявлены многочисленные прожилки, выполненные щёточками горного хрусталя, амethysta, халцедона. Наиболее крупные выделения раухтопаза приурочены к жилам крупноблоковых пегматитов, которых насчитывается 9, горного хрусталя, раухтопаза, реже – амethysta. Длина отдельных кристаллов достигает 7–10 см. Дымчатый кварц полупрозрачен.

В наиболее мощных пегматитах, состоящих из кварца, микроклина, мусковита, турмалина, реже – топаза, проявлена минерализация вольфрамитa, шеелита, ортита, монацита, циркона, колумбита размерами от 0,5 до 1,5 см в поперечнике, тяготеющая к дымчатому кварцу. Содержания элементов по штурфным пробам варьируют (%): иттрия от 0,1 до 0,7; церия от 0,2 до 1,7; циркония от 0,2 до 1,6; ниобия от 0,05 до 0,7; тантала от 0,01 до 0,2; триоксида вольфрама от 0,1 до 0,3.

В случае пегматитов Точильного ареала можно с уверенностью констатировать глубинный гранитоидный очаг и предположить кристаллизационную дифференциацию гранитоидного расплава, близкого к шшонитовому с образованием заключительных порций лейкогранитового состава, парагенетически с которым формировались пегматиты, насыщенные и водой и другими летучими компонентами.

Приведенные данные показывают, что гранитоиды Точильного штока характеризуются ярко выраженной радиогеохимической специализацией (табл. 1). Это подтверждается повышенными содержаниями в породах тория и отношениями Th/U (от 1,65 до 6,76). Такие показатели указывают на возможное обнаружение и уранового оруденения в пространственной и парагенетической свя-

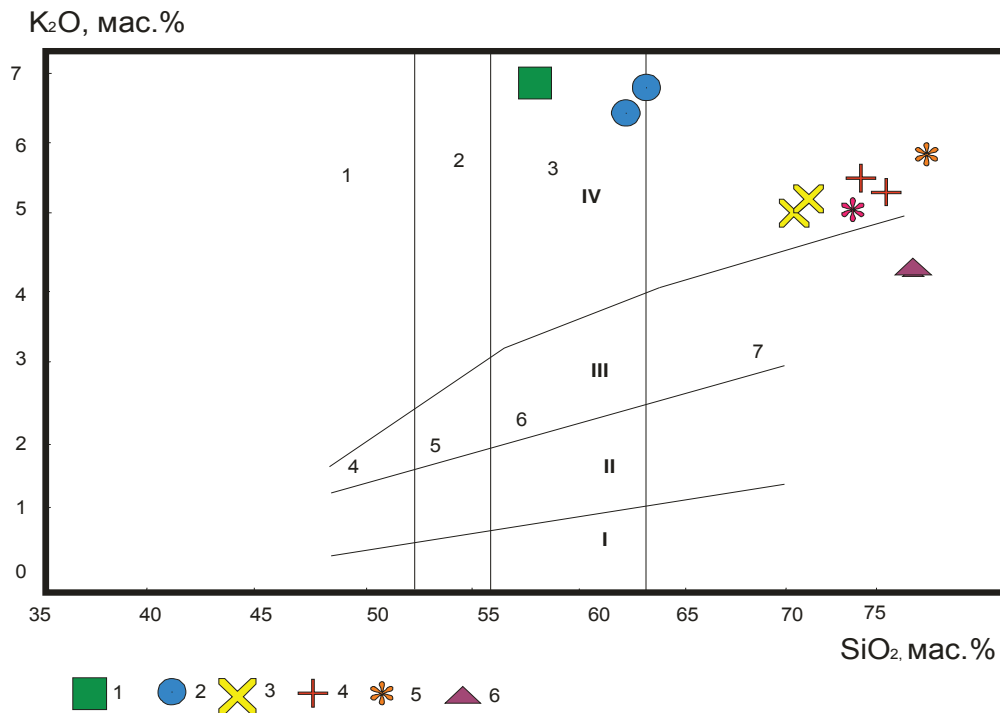


Рис. 7. Диаграмма K_2O-SiO_2 для породных типов Точильного ареала. Поля пород: 1 – абсарокит; 2 – шошонит; 3 – банакит; 4 – высоко-К базальт; 5 – высоко-К андезибазальт; 6 – высоко-К андезит; 7 – высоко-К дацит по [13]. Серии пород: I – толеитовая; II – известково-щелочная; III – высоко-К известково-щелочная; IV – шошонитовая. Остальные условные обозначения – на рис. 5

Fig. 7. K_2O-SiO_2 plot for rock types of Tochilny areal. Field of rocks: 1 – absarokite, 2 – shoshonite, 3 – banakite, 4 – high-K basalt, 5 – high-K basaltic andesite, 6 – high-K andesite, 7 – high-K dacite after [13]. Series of rocks: I – tholeiitic rock series, II – calc-alkalic, III – high-K calc-alkalic, IV – shoshonitic. Legend is in Fig. 5

зи с гранитоидами Точильного штока. Сопоставление проявления с аналогичными по составу щелочными и шошонитовыми гранитоидами других регионов, согласно сводке по [12], не противоречит такому заключению. И действительно в составе Белокурихинского плутона выявлена протяжённая Искровско-Белокурихинская уран-редкометалльно-редкоземельная зона.

Интерпретация результатов

Геологические и петрографические данные (наличие миароловых разностей, пегматитов) свидетельствуют о формировании пород штока на относительно небольших глубинах. Приведенные данные показывают, что гранитоиды Точильного штока формировались длительное время – не менее 24 млн лет. Скорость становления штока, которая и привела к формированию обратной зональности в строении массива, была небольшой. Такие условия генерации небольшого по размерам массива предполагают сложный сценарий его формирования.

По соотношению K_2O и SiO_2 все породы, кроме лейкогранитов дайки, следует отнести к шошонитовой серии (рис. 7). Лейкограниты дайки попадают в поле высоко-К известково-щелочной серии пород.

По соотношениям $Sr/Y-Y$ и $La/Yb-Yb$ породные типы Точильного ареала показывают явные

неоднозначные признаки смешанных пород: адакитовых и нормальных андезитов-дацитов-риолитов (рис. 8, а, б). А по соотношениям $La/Yb-Yb$ некоторые фигуративные точки составов пород тяготеют к тренду модели смешения различных магм (рис. 8, б).

По соотношению $Mg\#-SiO_2$ фигуративные точки составов пород показывают неоднозначность отнесения или к утолщённой нижней коре корово-производных адакито-подобных пород, или к метабазальтовым и эклогитовым экспериментальным расплавам (рис. 9, а). По соотношениям $Ni-SiO_2$ породы Точильного ареала однозначно попадают в поле утолщённой нижней коры корово-производных адакито-подобных пород (рис. 9, б).

Большое значение в понимании генезиса пород имеет источник плавления, за счёт которого образуются породы. Так, считается, что плавление источника пород, содержащих фазы Ti -обогащённых ингредиентов (рутила, ильменита), будет генерировать расплавы с высоким отношением Nb/Ta (>25), в то время как плавление источника с амфиболом приводит к формированию расплавов с более низким отношением Nb/Ta (<25) [19, 20]. В породных типах Точильного ареала отношения Nb/Ta варьируют от 4,5 до 13,7, что позволяет предполагать плавление амфибол-содержащего источника.

Ключевое значение для понимания генезиса

высоко-К адакито-подобных гранитоидов Точильного ареала имеют anomalно высокие концентрации в них Nb (от 12,5 до 42 г/т). Это свидетельствует об образовании их за счёт плавления высоко-Nb базальтов (NEB). Возможно, такими высоко-Nb базальтами могли быть метабазиты засурьинской или средне-кумирской свит, содержащих высокие концентрации Nb.

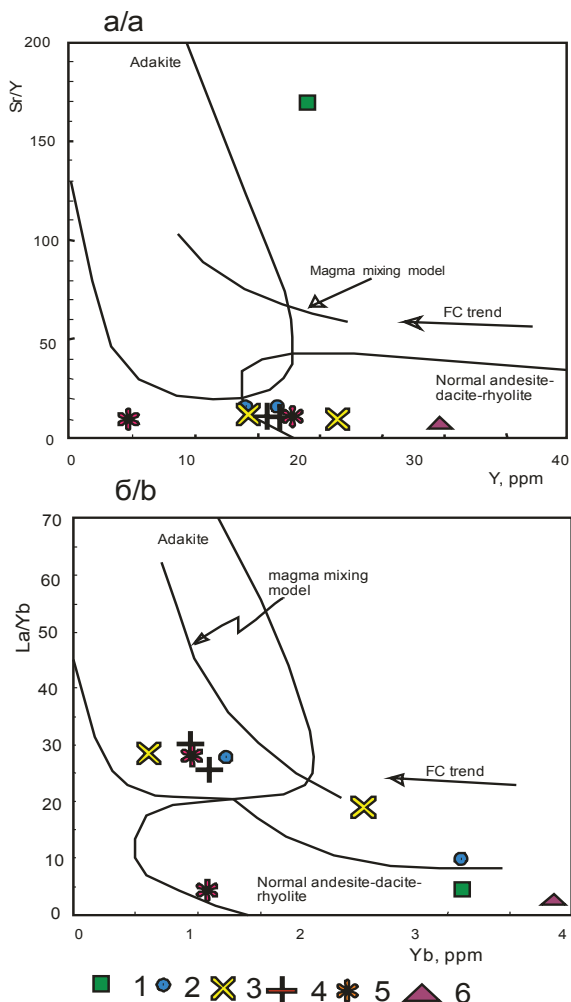


Рис. 8. Диаграммы: а) Sr/Y–Y; б) La/Yb–Yb по [14] для пород Точильного ареала. Поля пород: Адакитов (Adakite), нормальных андезитов-дацитов-риолитов (Normal andesite-dacite-rhyolite). Тренд фракционной кристаллизации (FC trend); модель магматического смешения по [15]. Остальные условные обозначения – на рис. 5

Fig. 8. Plots of: a) Sr/Y–Y; b) La/Yb–Yb after [14] for rocks of Tochilny areal. Fractional crystallization (FC) trend. Magma mixing modeling follows [15]. Legend is in Fig. 5

На основании приведенных данных можно сделать вывод о том, что в Точильном ареале имеет место совмещение двух типов источников расплавов: шошонитового и адакито-подобного. Следует отметить, что восточнее Точильного ареала располагается Айский ареал гранитоидов, где также зафиксировано совмещение двух типов магматических источников: шошонитового и адакитового [21].

В Яломанском гранитоидном ареале также отмечено совмещение и смешение различных типов расплавов [22]. Совмещение шошонитового и адакито-подобного расплавов отмечено и в других регионах [23, 24].

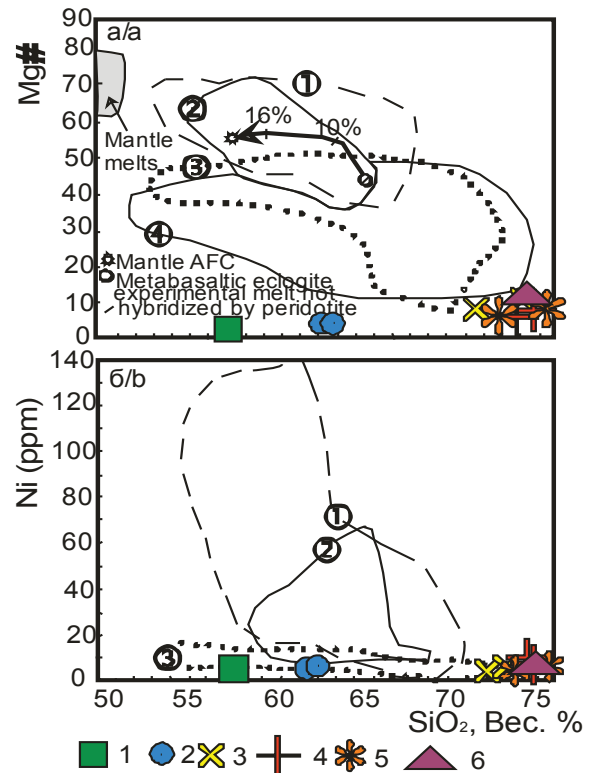


Рис. 9. Диаграммы Mg#–SiO₂ (а) и Ni – SiO₂ (б) по [16] для пород Точильного ареала. Мантийный тренд AFC на рис. 9, а по [17] с процентной ассимиляцией перидотитов. Начальная точка составов метабазальтов или эклогитовых экспериментальных расплавов, не гибридиризованных перидотитами, – по [17]. Поля: субдуцированных океанических корово-производных адакитов (1), утолщённой нижней корово-производных адакито-подобных пород (3), деламирированных ниже-корово-производных адакито-подобных пород (2), метабазальтовых и эклогитовых экспериментальных расплавов (1–4 GPa) (4), метабазальтовых и эклогитовых экспериментальных расплавов, гибридиризованных перидотитами, – по [18]

Fig. 9. Plots of Mg#–SiO₂ (a) and Ni–SiO₂ (b) after [16] for rocks of Tochilny areal. Mg-number (Mg#)–SiO₂ (wt. %) (a); Ni (ppm) – SiO₂ (wt. %) (b). Mantle AFC curve in (a) is after [17] with the percentage of assimilated peridotite show. The starting point represents the composition of metabasaltic or eclogite experimental melt not hybridized with peridotite [17]. Fields of subducted oceanic crust-derived adakites, thick lower crust-derived adakite-like rocks (3), delaminated lower crust-derived adakite-like rocks (2), metabasaltic and eclogite experimental melts (1–4 GPa) (4), metabasaltic and eclogite experimental melts hybridized by peridotite. Fields of subducted oceanic crust-derived adakites, thick lower crust-derived adakite-like rocks, delaminated lower crust-derived adakite-like rocks and metabasaltic and eclogite experimental melts hybridized with peridotite are after [18]. Legend is in Fig. 5

Геохимические характеристики анализируемых высоко-К адакито-подобных пород Точильного штока позволяют относить их к HSA типу магм (High Si adakites), источником которых является субконтинентальная литосферная мантия, преобразованная базальтоидными магмами, образовавшимися при плавлении субдущированной океанической литосферы под воздействием плюмового источника.

Единой классификации пегматитов в настоящее время не существует. По наиболее распространенной классификации, учитывающей рудные компоненты, пегматиты Точильного проявления ближе к семейству Nb>Ta-Y-F (NYF) по [25]. NYF пегматиты относятся к пералкалиновым по составу, отражая субалюминиевый, средне фракционированный анорогенный А-тип, или изверженный I-тип – родоначальный (пегматитогенерирующий) тип гранитов [26]. Пегматиты этого семейства часто обогащены HREE, Be, Ti, Sc и Zr [25]. Сходный состав характерен и для пегматитов Точильного проявления, однако для пегматитов последнего наблюдается связь с шошонитовым интрузивным магматизмом, в котором на заключительных этапах формируются значительные объемы адакито-подобных пород и лейкогранитов.

Более детальное подразделение пегматитов основано на глубинах их формирования. Выделяют 5 классов: абиссальные, мусковитовые, мусковит-редкометалльные, редкоэлементные и миаролитовые [25]. В нашем случае пегматиты Точильного проявления следует относить к редкоэлементному классу.

Обычно редкоэлементный класс пегматитов соотносится с зеленосланцевой и амфиболитовой фациями метаморфизма, формирующихся на малых и умеренных глубинах. Они, как правило, сильно переменны по составу и характеризуются различной степенью фракционирования редкоземельных элементов [25]. По геохимическим данным выделяются два подкласса: редкоземельный (REE), обогащенный Zr, Nb, Sc, и литиевый, обогащенный Rb, Cs [26]. Редкоземельный подкласс расплавов обычно генерируется из пост-орогенных и доанорогенных пералкалиновых и пералюминиевых расплавов, образующихся в условиях растяжения, в то время как литиевый подкласс рас-

плавов формируется из синколлизонных допосторогенных пералюминиевых расплавов, генерированных в обстановке сжатия [26]. Редкоземельный подкласс подразделяется на 3 типа, различающихся минералогическими и геохимическими особенностями. В составе редкоземельного подкласса рассматриваются следующие типы: 1 – алланит (ортит)-монацитовый, обогащенный легкими PЗЭ; 2 – эвксенитовый тип, обогащенный Y с переменными отношениями легких PЗЭ к тяжелым LREE/HREE; 3 – гадолинитовый тип, обогащенный тяжелыми PЗЭ с Y и Be [26]. Согласно приведенной классификации пегматиты Точильного проявления следует относить к ортит-монацитовому типу. Специфика пегматитов Точильного проявления – это высокие концентрации Zr, Ta, Nb, помимо типоморфных легких PЗЭ.

По другой классификации, основанной на соотношении главных породообразующих минералов, пегматиты Точильного штока следует относить к III группе, характеризующейся относительным обогащением летучими и кремнекислотой, но обедненными фосфором с кварцем, субальбусным калиевым полевым шпатом и мусковитом [27].

Заключение

Геолого-петрографические характеристики штока свидетельствуют о близкповерхностном становлении Точильного штока с образованием обратной зональности в его строении. Глубинный очаг был долгоживущим, и пролонгированный период последовательных пульсаций создал прецедент совмещения в небольшом по размеру массиве двух серий пород: высоко-К шошонитовой и высоко-К адакито-подобной.

Источником высоко-К адакито-подобной серии пород Точильного штока являлась субконтинентальная литосферная мантия, преобразованная базальтоидными магмами, образовавшимися при плавлении субдущированной океанической литосферы под воздействием плюмового источника Сибирского суперплюма.

С гранитоидами штока связаны пегматиты, относящиеся к семейству Nb>Ta-Y-F (NYF). Не исключено, что с магматическим очагом может быть связано и уран-редкометалльно-редкоземельное оруденение жильного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корреляция магматических и метаморфических комплексов западной части Алтае-Саянской складчатой области / С.П. Шокальский, Г.А. Бабин, А.Г. Владимиров, С.М. Борисов и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2000. – 187 с.
2. Vigneresse J.L. The role of discontinuous magma inputs in felsic magma and ore generation // *Ore geology Reviews*. – 2007. – V. 30. – P. 181–216.
3. Гаврюшкина О.А., Травин А.В., Крук Н.Н. Длительность формирования пермо-триасовых гранитоидов Алтая (по данным ⁴⁰Ar–³⁹Ar изотопных исследований) // *Корреляция Алтаид и Уралид: магматизм, метаморфизм, стратиграфия, геохронология, геодинамика и металлогения. Материалы 3 Международной конференции*. – Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения академии наук, 2016. – С. 58–59.
4. Anders E., Greevesse N. Abundances of the elements: meteoric and solar // *Geochim. Cosmochim. Acta*. – 1989. – V. 53. – P. 197–214.
5. Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids // *Geological Soc. America Bulletin*. – 1989. – V. 101. – P. 635–643.
6. Villaseca C., Barbero L., Herreros V. A re-examination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts // *Trans. of Royal Soc. of Edinburgh Earth Science*. – 1998. – V. 89. – P. 113–119.
7. A geochemical classification for granitic rocks / B.R. Frost, C.G. Barnes, W.J. Collins, R.J. Arculus, D.J. Ellis, C.D. Frost // *Journal of Petrology*. – 2001. – V. 42. – P. 2033–2048.

8. Clemens J.D., Holloway J.R., White A.J.R. Origin of an A-type granite: experimental constraints // *American Mineralogist*. – 1986. – V. 71. – P. 317–324.
9. Skjerlie K.P., Johnston A.D. Vapor-absent melting at 10 kbar of a biotite- and amphibole-bearing tonalitic gneiss: implications for the generation of A-type granites // *Geology*. – 1992. – V. 20. – P. 263–266.
10. Patiño Douce A.E. Generation of metaaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids // *Geology*. – 1997. – V. 25. – P. 743–746.
11. Partial melting of apatite-bearing charnockite, granulite, and diorite: melt compositions, restite mineralogy, and petrologic implications / J.S. Beard, G.E. Lofgren, A.K. Sinha, R.P. Tollo // *Journal of Geophysical Research*. – 1994. – V. 99. – P. 21591–21603.
12. Ножкин А.Д., Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в коллизионных и внутриплитных натрий-калиевых гранитоидах: уровни накопления, значение для металлогении // *Геохимия*. – 2014. – № 9. – С. 807–809.
13. Peccerillo A., Taylor S.R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1976. – V. 58. – P. 63–81.
14. Richards J.P., Kerrich R. Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis // *Economic Geology*. – 2007. – V. 102. – P. 537–576.
15. The generation of high Sr/Y plutons following Late Jurassic arc–arc collision, Blue Mountains province, NE Oregon / J.J. Schwartz, K. Johnson, E.A. Miranda, J.L. Wooden // *Lithos*. – 2011. – V. 126. – P. 22–41.
16. Geochemical, Sr-Nd-Pb, and zircon Hf-O isotopic compositions of Eocene-Oligocene shoshonitic and potassic adakite-like felsic intrusions in Western Yunnan, SW China: Petrogenesis and tectonic implications / Y.-J. Lu, R. Kerrich, T.C. McCuaig, Z.-X. Li, C.J.R. Hart, P.A. Cawood, Z.-Q. Hou, L. Bagas, J. Cliff, E. Belousova, S.-H. Tang // *Journal of Petrology*. – 2013. – V. 54. – P. 1309–1348.
17. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3·8 GPa / R.P. Rapp, N. Shimizu, M.D. Norman, G.S. Applegate // *Chemical Geology*. – 1999. – V. 160. – P. 335–356.
18. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization / Q. Wang, J.F. Xu, P. Jian, Z.W. Bao, Z.H. Zhao, C.F. Li, X.L. Xiong, J.L. Ma // *Journal of Petrology*. – 2006. – V. 47. – P. 119–144.
19. Foley S.F., Tiepolo M., Vannucci R. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones // *Nature*. – 2002. – V. 417. – P. 837–840.
20. Mechanisms of Archean crust formation inferred from high-precision HFSE systematics in TTGs / J.E. Hoffmann, C. Münker, T. Næraa, M.T. Rosing, D. Herwartz, D. Garbe-Schönberg, H. Svahnberg // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2011. – V. 75. – P. 4157–4178.
21. Гусев А.И. Петрогенезис совмещенных шопонитовых и высоко-К адakitовых гранитоидов раннего мезозоя Горного Алтая // *Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)*. – Иркутск, Институт земной коры СО РАН, 2016. – С. 58–60.
22. Crustal melting and magma mixing in a continental arc setting: Evidence from the Yaloman intrusive complex in the Gorniy Altai terrane, Central Asian Orogenic Belt / M. Chen, M. Sun, M.M. Buslov, K. Cai, G. Zhao, A.V. Kulikova, E.S. Rubanova // *Lithos*. – 2016. – V. 252–253. – P. 76–91.
23. Jeong-Im O., Sung H. C., Keewook Y. Origin of adakite-like plutons in southern Korea // *Lithos*. – 2016. – V. 262. – P. 620–635.
24. Partial melting of subducted paleo-Pacific plate during the early Cretaceous: Constraint from adakitic rocks in the Shaxi porphyry Cu–Au deposit, Lower Yangtze River Belt / J. Deng, X. Yang, S. Li, H. Gu, A.S. Mastoi, W. Sun // *Lithos*. – 2016. – V. 262. – P. 651–667.
25. London D. Pegmatites // *The Canadian Mineralogist*. – 2008. – Special Publication 10. – 345 p.
26. Cerný P., Ercit T.S. The classification of granitic pegmatites revisited // *The Canadian Mineralogist*. – 2005. – V. 43. – P. 2005–2026.
27. The P–Fe diagram for K-feldspars: A preliminary approach in the discrimination of pegmatites / L. Sánchez-Munoz, A. Müller, S.L. Andrés, R.F. Martin, P.J. Modreski, O.M. de Moura // *Lithos*, 2017. – V. 272–273. – P. 116–127.

Поступила 12.02.2017 г.

Информация об авторах

Гусев А.И., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры естественно-научных дисциплин, безопасности жизнедеятельности и туризма естественно-географического факультета Алтайского государственного гуманитарно-педагогического университета им. В.М. Шукшина.

Гусев Н.И., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий отделом Восточной Сибири Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского.

Табакаева Е.М., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник управления научно-исследовательской деятельности Алтайского государственного гуманитарно-педагогического университета им. В.М. Шукшина.

UDC 552.3:550.4:550.42:550.93

ABSOLUTE AGE, PETROLOGY, GEOCHEMISTRY AND ORE MINERALIZATION OF TOCHILNY STOCK IN GORNY ALTAI

Anatoliy I. Gusev¹,
anzerg@mail.ru

Nikolay I. Gusev²,
Nicolay_Gusev@mail.ru

Evgeniya M. Tabakaeva¹,
tabakaeva16@mail.ru

¹ Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University,
53, Vladimir Korolenko, Biysk, 659333, Russia.

² A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute,
74, Sredny prospect, Saint-Petersburg, 199106, Russia.

The relevance of the discussed issue is caused by the need of researching absolute age, petrology, geochemistry and ore mineralization of Tochilny stock which is represented by strong fractionated rocks from melanosyenite to leucogranite. Different types of ore mineralization of rare earth pegmatites and jeweller-ornamental stones are related to such rocks spatially and paragenetically.

The main aim of the research is to study absolute age, petrology, geochemical features of rocks and ore mineralization of Tochilny stock using the experimental diagrams, which allow solving the genetic problems and the physic-chemical features of petrogenesis.

The methods used in the study. Rare and scattered elements were determined in rocks by inductively coupled plasma method on the mass spectrometer «OPTIMA-4300», the rest elements, including REE, were determined by La-ISP-MS methods in the Laboratory VSEGEI (Saint-Petersburg) and OIGaG SO RAN (Novosibirsk). The absolute age of forming rocks was determined by U-Pb SIMS (ion micro-zond SHRIMP –II) method on zircon in the Laboratory VSEGEI (Saint-Petersburg).

Results. The paper introduces the data on absolute age, geochemistry and petrology of granitoids of Tochilny stock and its ore mineralization. Melanosyenite, syenite, granite-porphyre and leucogranite were revealed in the stock. Stock formation lasts for prolong period in 24 mln. years (from 238 to 262 mln. years). So long period of forming caused by combining derivatives of high-K shoshonitic series rocks and high-K adakite-like differences in one stock. Considering the Nb>Ta ratio in rocks one can assume melting of amphibole-containing source, meeting the high-Nb basalts (NEB) of thickened lower earth crust. This subcontinental lithospheric mantle, transformed by basalt magmas, generated at subduction ocean lithosphere melting, was transformed under the effect of plume source. Rare metal pegmatites, related to granitoids of Tochilny stock, refer to the Nb>Ta-Y-F (NYF) family. According to the geochemical data pegmatites refer to rare earth elements class (REE) enriched with Zr, Ta, Nb. The tetradic effect of REE M-type fractionation occurs in syenites.

Key words:

Geochemistry, petrology, melanosyenite, syenite, granite-porphyre, leucogranite, zircon, absolute age, rare metal pegmatite, tetradic effect of REE fractionation.

REFERENCES

- Shokalsky S.P., Babin G.A., Vladimirov A.G., Borisov S.M. *Korrelyatsiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov zapadnoy chasti Altae-Sayanskoy sklachatoy oblasti* [Correlation of magmatic and metamorphic complexes of the western part of the Altai-Sayan folded region]. Novosibirsk, SB RAN Press, filial «Geo», 2000. 187 p.
- Vigneress J.L. The role of discontinuous magma inputs in felsic magma and ore generation. *Ore geology Reviews*, 2007, vol. 30, no. 3–4, pp. 181–216. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.03.001>
- Gavryushkina O.A., Travin A.V., Kruk N.N. Dlitelnost formirovaniya permo-triasovyykh granitoidov Altaya (po dannym ⁴⁰Ar–³⁹Ar izotopnykh issledovaniy) [Long-duration of forming Permo-Triassic granitoids of Altai (on data of ⁴⁰Ar–³⁹Ar isotopic researching)]. *Korrelyatsiya Altaid i Uralid: magmatizm, metamorfizm, stratigrafiya, geokhronologiya, geodinamika i metallogeniya. Materialy 3 mezhdunarodnoy konferentsii* [Correlation of Altai and Uralid: magmatism, metamorphism, stratigraphy, geochronology, geodynamic and metallogeny. Materials of the 3rd International conference]. Novosibirsk, Siberian branch of Academy Science Publ. House, 2016. pp. 58–59.
- Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements: Meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, vol. 53, no. 1, pp. 197–214. DOI: [10.1016/0016-7037\(89\)90286-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90286-X)
- Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, vol. 101, no. 5, pp. 635–643. DOI: [10.1130/0016-7606\(1989\)101<0635:TDOG>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2)
- Villaseca C., Barbero L., Herreros V. A re-examination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 1998, vol. 89, no. 2, pp. 113–119. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0263593300007045>
- Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, 2001, vol. 42, no. 11, pp. 2033–2048. DOI: <https://doi.org/10.1093/petrology/42.11.2033>
- Clemens J.D., Holloway J.R., White A.J.R. Origin of an A-type granite: experimental constraints. *American Mineralogist*, 1986, vol. 71, pp. 317–324.
- Skjerlie K.P., Johnston A.D. Vapor-absent melting at 10 kbar of a biotite- and amphibole-bearing tonalitic gneiss: implications for the generation of A-type granites. *Geology*, 1992, vol. 20, no. 3, pp. 263–266. DOI: [10.1130/0091-7613\(1992\)020<0263:VAMAKO>?2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0263:VAMAKO>?2.3.CO;2)

10. Patiño Douce A.E. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids. *Geology*, 1997, vol. 25, no. 8, pp. 743–746. DOI: 10.1130/0091-7613(1997)025<0743:GOMATG>2.3.CO;2
11. Beard J.S., Lofgren G.E., Sinha A.K., Tollo R.P. Partial melting of apatite-bearing charnockite, granulite, and diorite: melt compositions, restite mineralogy, and petrologic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1994, vol. 99, no. B11, pp. 21591–21603. DOI: 10.1029/94JB02060
12. Nozhkin A.D., Rikhvanov L.P. Radioactive elements in collisional and within-plate Sodic-Potassic Granitoids: Accumulation levels and metallogenic significance. *Geochemistry International*, 2014, vol. 52, no. 9, pp. 740–757. In Rus. DOI: 10.1134/S0016702914090080
13. Peccerillo A., Taylor S.R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, vol. 58, no. 1, pp. 63–81. DOI: 10.1007/BF00384745
14. Richards J.P., Kerrich R. Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Economic Geology*, 2007, vol. 102, no. 4, pp. 537–576. DOI: 10.2113/gsecongeo.102.4.537
15. Schwartz J.J., Johnson K., Miranda E.A., Wooden J.L. The generation of high Sr/Y plutons following Late Jurassic arc–arc collision, Blue Mountains province, NE Oregon. *Lithos*, 2011, vol. 126, no. 1–2, pp. 22–41. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2011.05.005>
16. Lu Y.-J., Kerrich R., McCuaig T.C., Li Z.-X., Hart C.J.R., Cawood P.A., Hou Z.-Q., Bagas L., Cliff J., Belousova E., Tang S.-H. Geochemical, Sr-Nd-Pb, and zircon Hf-O isotopic compositions of Eocene-Oligocene shoshonitic and potassic adakite-like felsic intrusions in Western Yunnan, SW China: Petrogenesis and tectonic implications. *Journal of Petrology*, 2013, vol. 54, no. 7, pp. 1309–1348. DOI: <https://doi.org/10.1093/petrology/egt013>
17. Rapp R.P., Shimizu N., Norman M.D., Applegate G.S. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 1999, vol. 160, no. 4, pp. 335–356. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00106-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00106-0)
18. Wang Q., Xu J.F., Jian P., Bao Z.-W., Zhao Z.-H., Li C.-F., Xiong X.L., Ma J.L. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology*, 2005, vol. 47, no. 1, pp. 119–144. DOI: <https://doi.org/10.1093/petrology/egi070>
19. Foley S.F., Tiepolo M., Vannucci R. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones. *Nature*, 2002, vol. 417, no. 6891, pp. 837–840. DOI: 10.1038/nature00799
20. Hoffmann J.E., Münker C., Næraa T., Rosing M.T., Herwartz D., Garbe-Schönberg D., Svahnberg H. Mechanisms of Archean crust formation inferred from high-precision HFSE systematics in TTGs. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, vol. 75, no. 15, pp. 4157–4178. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2011.04.027>
21. Gusev A.I. Petrogenesis sovmeshchennykh shoshonitovykh i vysokok-K adakitovykh granitoidov rannego mezozoya Gornogo Altaya [Petrogenesis of reconcile shoshonitic and high-K adakitic granitoids of early Mesozoic of Gorny Altai]. *Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentralno-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu)* [Geodynamic evolution of lithosphere Central-Asian mobile belt (from ocean to continent)]. Irkutsk, Institute of Erath crust SB RAS, 2016. pp. 58–60.
22. Chen M., Sun M., Buslov M.M., Cai K., Zhao G., Kulikova A.V., Rubanova E.S. Crustal melting and magma mixing in a continental arc setting: Evidence from the Yaloman intrusive complex in the Gorny Altai terrane, Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 2016, vol. 252–253, pp. 76–91. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2016.02.016>
23. Oh J.-I., Choi S.H., Yi K. Origin of adakite-like plutons in southern Korea. *Lithos*, 2016, vol. 262, pp. 620–635. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2016.07.040>
24. Deng J., Yang X., Li S., Gu H., Mastoi A.S., Sun W. Partial melting of subducted paleo-Pacific plate during the early Cretaceous: Constraint from adakitic rocks in the Shaxi porphyry Cu-Au deposit, Lower Yangtze River Belt. *Lithos*, 2016, vol. 262, pp. 651–667. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2016.07.039>
25. London D. Pegmatites. *The Canadian Mineralogist*, 2008, Special Publication 10, 345 p.
26. Černý P., Ercit T.S. The classification of granitic pegmatites revisited. *The Canadian Mineralogist*, 2005, vol. 43, no. 6, pp. 2005–2026. DOI: 10.2113/gscanmin.43.6.2005
27. Sánchez-Munoz L., Müller A., Andrés S.L., Martín R.F., Modreski P.J., de Moura O.M. The P – Fe diagram for K-feldspars: A preliminary approach in the discrimination of pegmatites. *Lithos*, 2017, vol. 272–273, pp. 116–127.

Received: 12 February 2017.

Information about the authors

Anatoliy I. Gusev, Dr. Sc., professor, Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University.

Nikolay I. Gusev, Cand. Sc., head of the department, A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute.

Evgeniya M. Tabakaeva, Cand. Sc., researcher, Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University.