

УДК 553.521+235.222

## ГЕОЛОГИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ АЛАХИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СПОДУМЕНОВЫХ ГРАНИТ-ПОРФИРОВ (ГОРНЫЙ АЛТАЙ, РОССИЯ)

© 2016 г. И. Ю. Анникова<sup>a, b, \*</sup>, А. Г. Владимиров<sup>a, b, c</sup>, С. З. Смирнов<sup>a, b, c</sup>, О. А. Гаврюшкина<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева  
630090, Новосибирск, пр. Коптюга, 3

<sup>b</sup>Томский государственный университет  
634050, Томск, пр. Ленина, 36

<sup>c</sup>Новосибирский государственный университет  
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

\*E-mail: iyuannikova@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2015 г.

Алахинское литий-танталовое месторождение в Южном Алтае (Россия), представленное штоком сподуменсодержащих гранит-порфиров, локализовано в пределах уникального по протяженности (более 1000 км) Калба-Нарым-Коктогайского литий-танталового редкометалльно-гранитного пояса, входящего в состав Алтайской аккреционно-коллизионной системы. Судя по прогнозным оценкам, Алахинское месторождение можно считать не вскрытым эрозией аналогом пегматитового тела, как по размерам, так и по средним содержаниям ценных компонентов ( $\text{Li}_2\text{O}$  – 0.98 мас. % и  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  – 114 г/т), однако рудогенерирующий потенциал этого месторождения пока недостаточно изучен и не востребован. В статье предпринята попытка восполнить этот пробел детальными минералогическими исследованиями, позволяющими понять механизм кристаллизации литиевых кремнекислых магм и характер перераспределения компонентов в ходе магматических и постмагматических процессов. Акцессорные парагенезисы в главных петрографических разновидностях пород Алахинского штока – мусковит-сподумен-калишпат-альбитовых гранит-порфирах и мусковитовых альбититах – оказались практически идентичными. Значительное сходство в химизме главных породообразующих минералов сподуменовых гранит-порфиров Алахинского штока и сподуменовых пегматитов ряда крупных месторождений позволяет предполагать близкий петрогенетический механизм их формирования. Формирование минеральных ассоциаций мусковитовых альбититов Алахинского штока, слагающих апикальную часть штока и имеющих постепенные переходы со сподуменовыми гранит-порфирами, связано с постмагматическим метасоматическим преобразованием последних.

DOI: 10.7868/S0016777016050026

### ВВЕДЕНИЕ

Алахинское месторождение в Южном Алтае (Россия), представленное штоком сподуменсодержащих гранит-порфиров и локализованное в пределах Калба-Нарым-Коктогайского литий-танталового редкометалльного пояса, является специфическим геологическим объектом, отличающимся от классических месторождений сподуменовых пегматитов Сибири, Казахстана и Китая по возрасту (поздний триас–ранняя юра) и по текстурно-структурным особенностям руд (Кудрин и др., 1994; Владимиров и др., 1997, 1998, 2012; Загорский и др., 2014). Термин “сподуменовый гранит” введен В.В. Ляховичем (Ляхович, 1963), обнаружившим эти породы в районе пегматитового месторождения Тастыг в Южной Туве.

Судя по прогнозным оценкам, Алахинское месторождение можно считать не вскрытым эрозией аналогом пегматитового тела с зональностью,

например, жилы № 3 месторождения Коктогай (Северо-Восточный Китай) (Wang *et al.*, 2002; Zhu *et al.*, 2006), однако рудогенерирующий потенциал Алахинского месторождения пока недостаточно изучен и не востребован.

Месторождение было открыто в начале 90-х годов XX века геологами Алтайской геолого-поисковой экспедиции В.И. Тимкиным и В.И. Масловым. Оно находится в труднодоступном районе Горного Алтая, с чем связана его очевидная недоизученность, в том числе, с точки зрения минералогии и микроминералогии. Авторы настоящей статьи предприняли попытку восполнить этот пробел. В основу статьи положены рабочие коллекции (более 200 проб), опытно-лабораторные (8) и опытно-промышленные (3) пробы, отобранные в ходе геологических экспедиций ИГМ СО РАН 1993–2000 гг., выполнявшихся по заказу РОСАТОМА. Минералогические исследования выполнены в рамках

междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН “Элементы-примеси в редкометалльных и полиметаллических рудно-магматических системах: минералогия и микроминералогия, новые технологии механохимической переработки руд, переоценка редкоэлементного потенциала месторождений” (2012–2014 гг.) и проекта Томского государственного университета “Новые критерии поиска и оценки качества руд редких элементов в гранитно-пегматитовых системах” (2012–2013 гг.).

Детальные минералогические исследования сподуменовых гранит-порфиров Алахинского штока, представляющих собой, по сути, бедную литий-танталовую руду (вариации содержаний  $\text{Li}_2\text{O}$  – 0.24–1.46, среднее – 0.98 мас. %,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  – 70–180 г/т, среднее – 114 г/т), позволяют не только понять механизм кристаллизации литиевых кремнекислых магм и характер перераспределения компонентов в ходе магматических и постмагматических процессов, но и имеют принципиальное значение для разработки схемы возможного обогащения этих руд в будущем.

#### ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ, ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ И ВОЗРАСТ

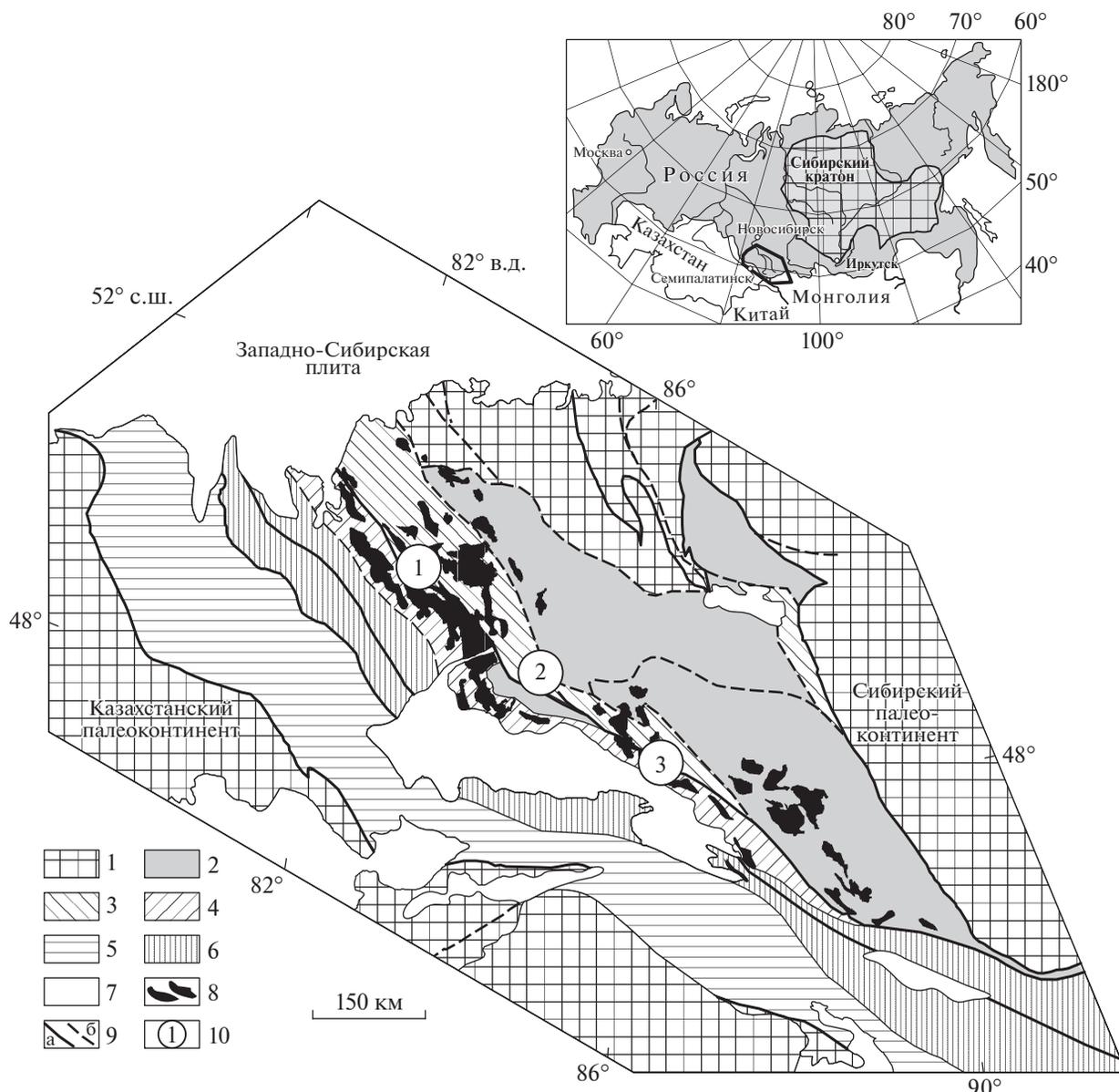
Алахинское литий-танталовое месторождение локализовано в пределах уникального по протяженности (более 1000 км) Калба-Нарым-Коктогайского литий-танталового редкометалльно-гранитного пояса (Kremenetsky, 1996) (фиг. 1). В тектоническом плане этот пояс входит в состав Алтайской аккреционно-коллизийной системы, формирование которой произошло в результате взаимодействия Сибирского и Казахстанского палеоконтинентов и закрытия Чарского палеоокеана (Дьячков и др., 1994, 2010; Большой Алтай..., 1998, 2000; Буслов и др., 2003; Владимиров и др., 2003, 2008; Гусев и др., 2012). Особое место в его формировании занимает Иртышская зона смятия, контролировавшая геологическую позицию, гранитоидный магматизм и редкометалльное оруденение (Владимиров и др., 2008). В состав Калба-Нарым-Коктогайского литий-танталового редкометалльно-гранитного пояса, наряду с Алахинским месторождением, входят крупные поля пегматитов промышленного значения: Калба-Нарымская – на территории Восточного Казахстана и Коктогайская – на территории Северо-Западного Китая (Liu *et al.*, 1997; Zhu *et al.*, 2006) (см. фиг. 1).

Алахинский шток относится к внутриплитным образованиям, внедрение которого контролировалось активизированными в раннем мезозое крупными сдвиговыми деформациями литосферы (Владимиров и др., 2008).

В легендах к разномасштабным геологическим картам сподуменовые гранит-порфиры Алахинского штока отнесены к самостоятельному алахинскому комплексу ( $J_1a$ ) (Шокальский и др., 2000). Этот шток прорывает биотитовые порфировидные граниты главной фазы чиндагатуйского комплекса ( $T_3-J_1$ ) в северной части одноименного массива (фиг. 2). Геологических данных, свидетельствующих о прорывании гранит-порфирами рудных тел Чиндагатуйского W–Mo-месторождения, расположенного в 3 км к юго-западу от Алахинского штока и также приуроченного к эндоконтакту Чиндагатуйского массива, нет, однако, исходя из общего структурного плана рудного района, можно достаточно уверенно предположить, что сподуменовые гранит-порфиры являются здесь самыми молодыми образованиями (Владимиров и др., 1998).

Морфология Алахинского штока достоверно не известна. На современном эрозионном срезе он представлен двумя выходами, которые отвечают прикровельным фациям и, вероятнее всего, представляют собой части одного крупного тела, большая часть которого расположена ниже современного эрозионного среза (фиг. 3). Крупный выход, именуемый Главным телом, вытянут в субмеридиональном направлении и имеет максимальные размеры  $1000 \times 650$  м ( $\sim 0.3$  км<sup>2</sup>), выход меньшего размера (Малое тело), удаленный от Главного тела на 50 м к юго-востоку, имеет неправильную, близкую к изометричной форму с размерами  $400 \times 250$  м ( $\sim 0.2$  км<sup>2</sup>). Контакты Алахинского штока с вмещающими породами – интрузивные, иногда сопровождающиеся жилообразными апофизами и прожилковыми инъекциями, интенсивно грейзенизированы и турмалинизированы. Степень метасоматического преобразования пород экзоконтакта в некоторых участках доходит до образования сливных кварц-турмалиновых пород.

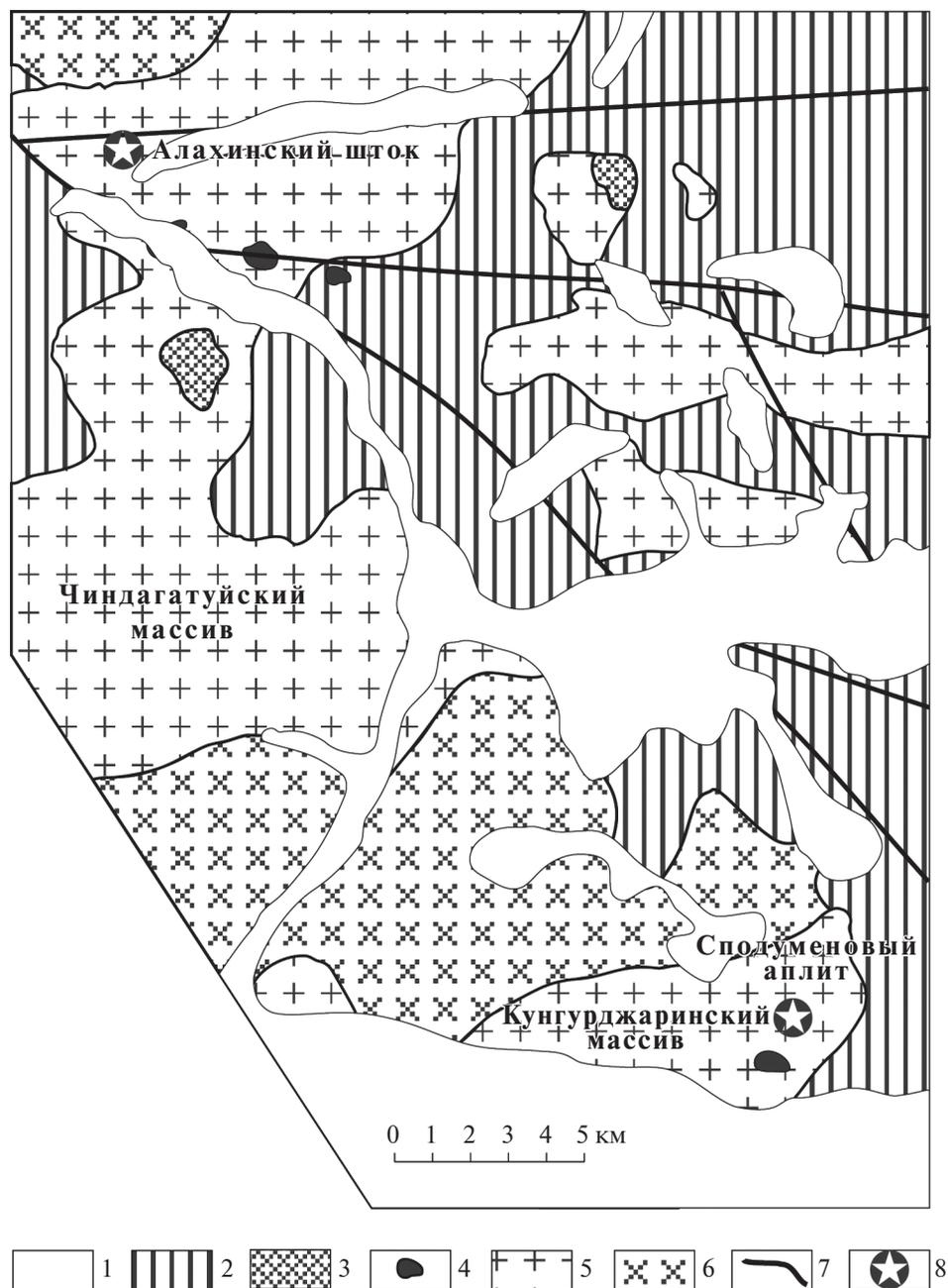
Основной объем Алахинского штока сложен мусковит-сподумен-калишпат-альбитовыми гранит-порфирами с мелко-среднезернистой основной массой. Авторы отдают себе отчет в том, что в данном случае речь идет о породе с текстурно-структурными признаками, промежуточными между гранит-порфирами и гранитами. Отмечается неоднородное распределение сподумена в гранит-порфирах, в результате чего выделяются участки, представленные бесподуменовыми мусковит-альбитовыми гранит-порфирами. По данным В.С. Кудрина с соавторами (1994), во внутреннем строении массива отчетливо проявлена зональность в вертикальном направлении. Апикальная часть массива сложена практически мономинеральными альбититами мощностью до первых десятков метров, верхняя часть массива – мусковит-сподумен-альбитовыми гранит-



**Фиг. 1.** Геотектоническая схема Калба-Нарым-Коктогайского редкометалльного пояса (Li-Rb-Cs, Ta-Nb, Sn-W) и литиевых месторождений (Liu *et al.*, 1997; Большой Алтай..., 1998, 2000; Zhu *et al.*, 2006; Дьячков, 2011). 1 – неопротерозойские-раннепалеозойские структурно-вещественные комплексы Сибирского и Казахстанского палеоконтинентов; 2 – Алтае-Монгольский микроконтинент; 3–6 – окраинно-континентальные и океанические террейны средне-позднепалеозойского возраста: 3 – Рудно-Алтайский островодужный террейн, 4 – Калба-Нарымский турбидитовый террейн, 5 – Жарма-Саурский островодужный террейн, 6 – Чарский океанический; 7 – кайнозойские отложения; 8 – гранитоидные батолиты в возрастном диапазоне от карбона до ранней юры включительно; 9 – разломы (достоверные (а) и предполагаемые (б)); 10 – крупные поля сподуменовых пегматитов и гранит-порфиров (1 – Калба-Нарымское, 2 – Алахинское, 3 – Коктогайское).

порфирами, тогда как в его нижней части преобладают мусковит-сподуменовые граниты с олигоклазом. Все перечисленные разновидности пород, слагающие Алахинский шток, связаны постепенными переходами, резких контактов и секущих взаимоотношений между ними не установлено (Кудрин и др., 1994).

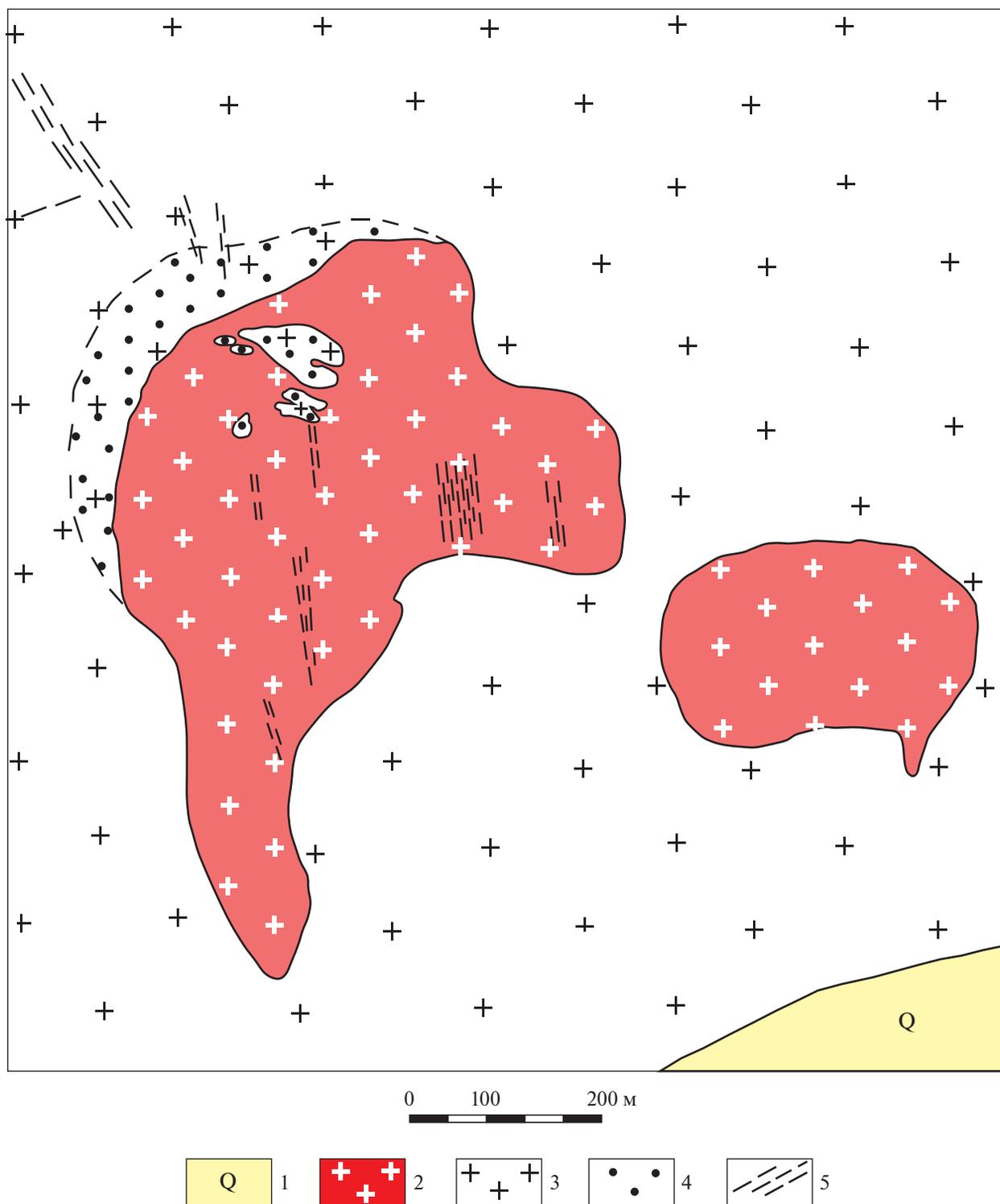
Первые попытки надежного определения возраста пород Алахинского штока были предприняты В.А. Ильным с соавторами (Ильин и др., 1994). Для сподуменовых гранит-порфиров Алахинского штока U-Pb-изотопный возраст по двум фракциям цирконов дал согласующиеся между собой значения 183 и 188 млн лет, но потребова-



**Фиг. 2.** Геологическая схема Рахмановского батолита. 1 – четвертичные отложения; 2 – осадочные породы катунской свиты (V–С); 3–5 – гранит-лейкограниты чиндагатуйского комплекса ( $T_3$ – $J_1$ ): 3 – “постгранитные” гранит-порфиры, 4 – мусковитовые (+ турмалин, гранат) лейкограниты, 5 – порфировидные биотитовые граниты; 6 – известково-щелочные гранитоиды рахмановского комплекса ( $D_2$ ); 7 – тектонические нарушения; 8 – сподуменовые граниты и аплиты.

лось независимое подтверждение другим методом изотопной геохронологии. Этими же авторами по пяти образцам сподуменовых гранит-порфиров Алахинского штока была получена валовая Rb-Sr изохрона с параметрами:  $T = 195 \pm 3$  млн лет, СКВО = 0.6 (Ильин и др., 1994). Позднее по восьми образцам сподуменовых гранит-порфи-

ров Алахинского штока и лейкогранитов из близлежащих жил в Чиндагатуйском массиве была построена валовая Rb-Sr изохрона, которая показала следующие результаты:  $T = 198.6 \pm 1.1$  млн лет,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 = 0.7124 \pm 91$ , СКВО = 1.3 (Kostitsyn *et. al.*, 1998).



**Фиг. 3.** Геологическая схема Алахинского штока сподуменовых гранит-порфиров (Кудрин и др., 1994) с дополнениями (Владимиров и др., 1997, 1998; Шокальский и др., 2000). 1 – четвертичные отложения; 2 – сподуменовые гранит-порфиры Алахинского штока и его сателлитов ( $T_3-J_1$ ); 3 – гранит-лейкограниты чиндагуйского комплекса ( $T_3-J_1$ ); 4 – зоны грейзенизации и альбитизации; 5 – разрывные нарушения.

## МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ И ПЕТРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОД

### *Минералого-петрографические особенности пород*

Главными петрографическими разновидностями пород Алахинского штока являются: мусковит-сподумен-калишпат-альбитовые гранит-порфиры и мусковитовые альбититы.

*Мусковит-сподумен-калишпат-альбитовые гранит-порфиры* – светло-серые, кремово-серые или почти белые породы с порфировидной структурой. Вкрапленники размером до 1 см, на долю которых приходится от 25 до 40 об. %, представлены “горошковидным” кварцем (до 50 об. %), таблитчатыми кристаллами калиевого полевого шпата (до 20 об. %), пластинками мусковита (до 10 об. %) и призматическим сподуменом (до 20 об. %). Мелко-среднезернистая основная масса сложена альбитом (до 45 об. %), кварцем (до 35 об. %) и калиевым полевым шпатом (до 10 об. %) (фиг. 4а, б). Для сподуменных гранит-порфиров весьма характерны микроструктуры “снежного кома”, обусловленные закономерно ориентированными мелколеистовыми включениями альбита и калиевого полевого шпата во вкрапленниках кварца (фиг. 5а–г).

Вкрапленники калиевого полевого шпата обычно сдвойникованы в виде микроклиновой решетки (фиг. 6а, б), а по периферическим зонам наблюдаются обильные включения лейст альбита и субизометричных зерен кварца (фиг. 6в, г).

Вкрапленники сподумена обладают различной степенью идиоморфизма: наблюдаются вкрапленники с относительно правильными кристаллографическими очертаниями (фиг. 7а) и зерна, несущие признаки частичного растворения (фиг. 7б, в). Крупные идиоморфные вкрапленники сподумена содержат обильные включения кварца, калиевого полевого шпата и лейст альбита (фиг. 7г).

*Альбититы* – белые мелко- и тонкозернистые массивные породы, сложенные преимущественно альбитом (до 65 об. %), бесцветным или серебристым мусковитом (до 15 об. %), кварцем (до 15 об. %), редко – сподуменом (не более 5 об. %) (фиг. 4в).

Зерна кварца в альбититах имеют округлую или неправильную форму, нередко с признаками травления и содержат включения альбита (фиг. 5д, е).

Все изученные вкрапленники сподумена в альбититах, размер которых, как правило, не превышает 10 мм, не обладают четкими кристаллографическими очертаниями и несут следы глубокой коррозии, проявленной в том, что края кристаллов сильно “изъедены”, а сами кристаллы трещинами разделены на отдельные блоки (фиг. 7д, е).

### *Петрогеохимический состав пород*

Петрогеохимические составы представительных проб пород Алахинского штока и вмещающего его Чиндагатуйского массива приведены в табл. 1. Для петрохимического состава пород Алахинского штока характерны низкие содержания  $TiO_2$ ,  $\Sigma Fe_2O_3$ ,  $MnO$ ,  $MgO$  и  $CaO$ . В ряду сподуменных гранит-порфиров → альбититы наблюдается снижение содержаний  $SiO_2$  (от 73.65 до 66.34 мас. %) и  $K_2O$  (от 3.31 до 0.20 мас. %) и повышение  $Al_2O_3$  (от 19.10 до 22.11 мас. %),  $Na_2O$  (от 4.74 до 9.20 мас. %) и  $CaO$  (от 0.12 до 0.81 мас. %) (см. табл. 1). На геохимическую специфику сподуменных гранит-порфиров Алахинского штока, являющихся аналогами сподумен-альбитовых редкометалльных пегматитов, ранее уже обращалось внимание (Кудрин и др., 1994; Владимиров и др., 1998). Здесь же отметим, что в этих породах, в сравнении с гранитами и лейкогранитами Чиндагатуйского массива, на фоне лавинообразного возрастания  $Li$  (до 5800 г/т), концентрации редкоземельных элементов ( $P3\Theta$ ) падают до аномально низкого уровня ( $\Sigma P3\Theta = 0.27$  г/т) (см. табл. 1), а спектры их распределения характеризуются слабым отрицательным наклоном и отчетливым европейским минимумом (фиг. 8). Для альбититов, в сравнении с гранит-порфирами, характерно обеднение  $Li$ ,  $Rb$ ,  $Be$  и  $Nb$  (см. табл. 1).

### *Акцессорная минерализация*

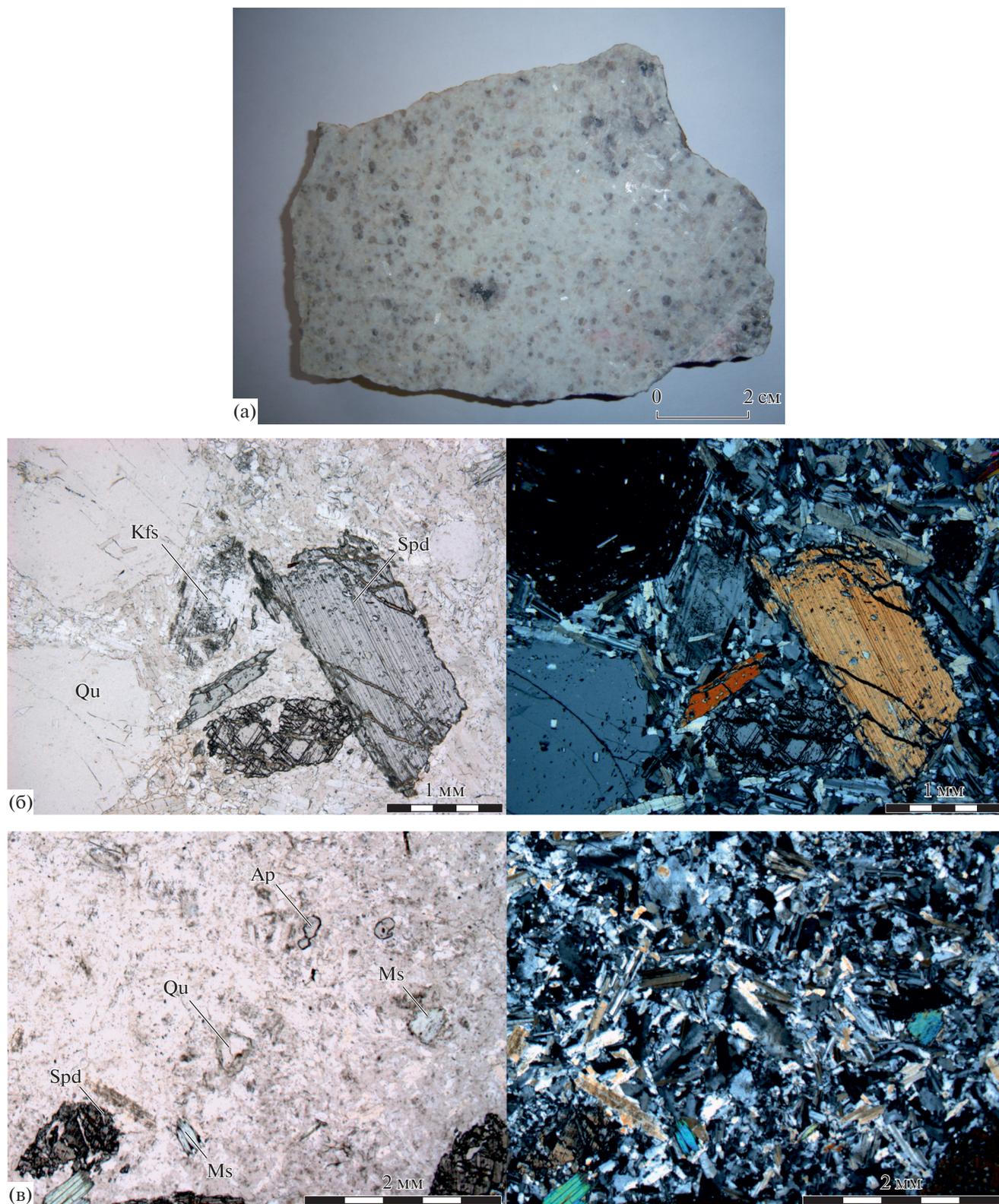
Диагностика акцессорных минеральных парагенезисов в породах Алахинского штока проводилась методом сканирующей электронной микроскопии.

*Пирит* характерен только для мусковит-сподумен-калишпат-альбитовых гранит-порфиров, в исследованных образцах мусковитовых альбититов он диагностирован не был.

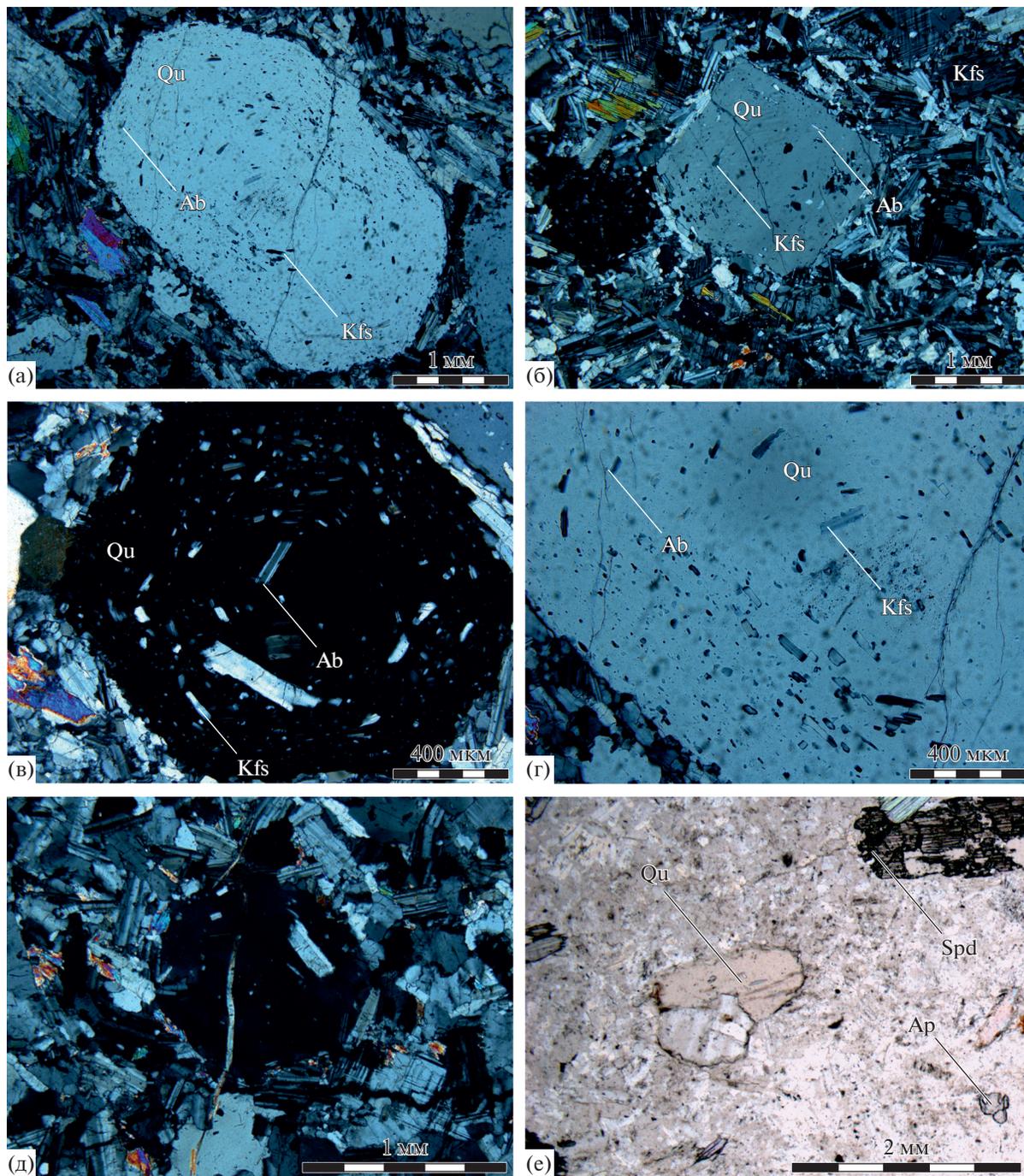
В гранит-порфирах он образует макроскопически различимые идиоморфные зерна кубического габитуса. Предварительно, на стадии петрографических исследований, было установлено, что зерна пирита равномерно рассеяны в мелкозернистом матриксе гранит-порфиров. При исследованиях на сканирующем электронном микроскопе установлено, что кристаллы пирита всегда почти нацело замещены лимонитом, размеры псевдоморфоз которого достигают 2 мм, реликты же пирита встречаются крайне редко (фиг. 9а).

*Апатит* в мусковит-сподумен-калишпат-альбитовых гранит-порфирах встречается только в виде микровключений в порообразующих минералах, он образует длиннопризматические и игольчатые кристаллы размером до 0.1 мм. Иногда в срезах наблюдаются четкие гексагональные сечения (фиг. 9б).

Содержание апатита в мусковитовых альбититах оказалось существенно выше, чем в гранит-



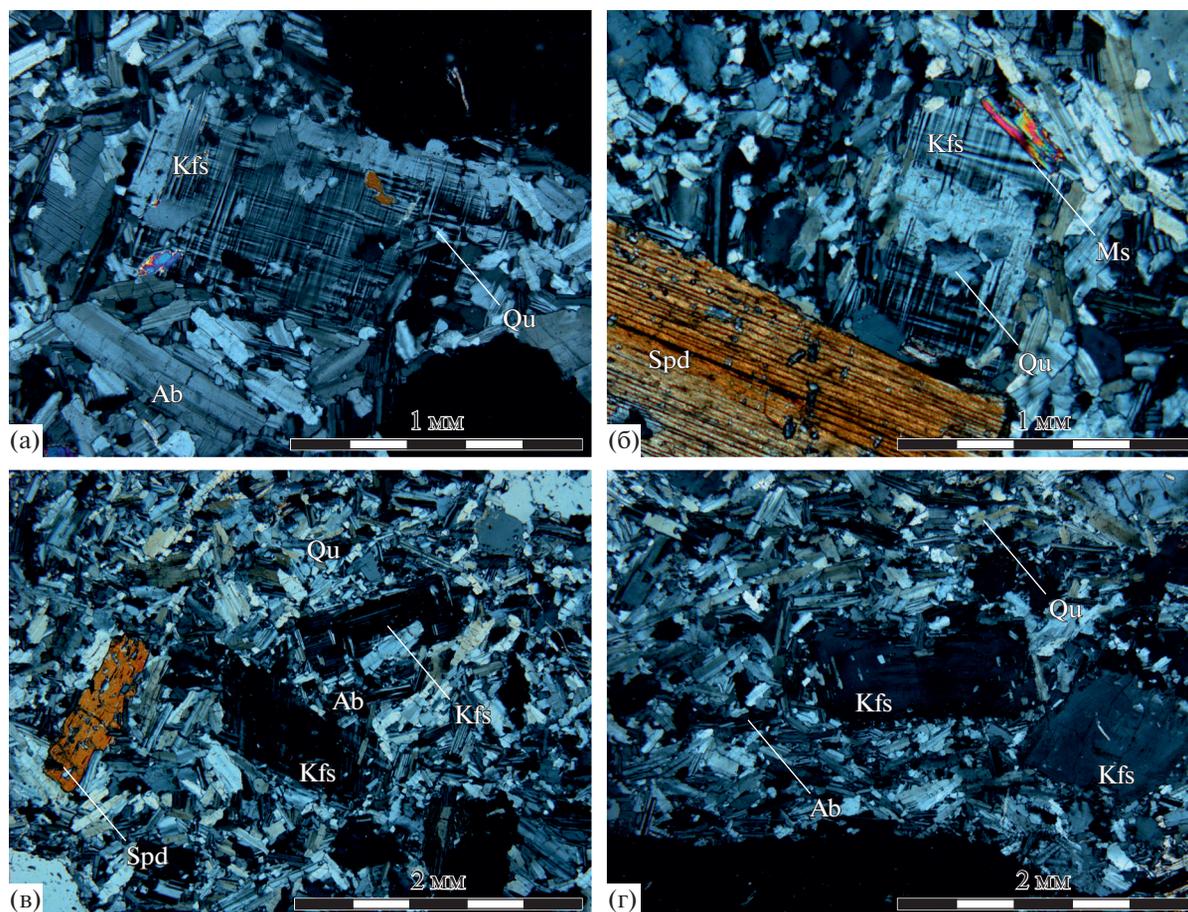
**Фиг. 4.** Структуры пород Алахинского штока. а, б – мусковит-сподумен-калишпат-альбитовые гранит-порфиры: а – фото шлифовки, б – микроструктура (слева – николи параллельны, справа – николи скрещены), в – мусковитовые альбититы (слева – николи параллельны, справа – николи скрещены). Пояснения в тексте.



**Фиг. 5.** Вкрапленники кварца (Qu) с микровключениями минералов в породах Алахинского штока: а–г – мусковит-сподумен-калишпат-альбитовые гранит-порфиры, д, е – мусковитовые альбиты. Микровключения минералов во вкрапленниках кварца: Ab – альбит, Ap – апатит, Kfs – калиевый полевой шпат, Spd – сподумен. Фото е – николи параллельны, остальные – николи скрещены.

порфирах. Если в гранит-порфирах он встречается только в виде микроминеральных включений, то в альбититах, помимо этого, и в виде субидiomорфных вкрапленников размером до 3 мм и их сростков в мелкозернистом матриксе. Судя по се-

чениям, эти вкрапленники, вероятно, имеют призматический габитус. Отдельные зерна апатита и их сростки ксеноморфны и заполняют интерстиции между породообразующими минералами альбититов. В сростках с мусковитом обнаруже-



Фиг. 6. Вкрапленники калиевого полевого шпата (KFs) в сподуменовых гранит-порфирах Алахинского штока. Николи скрещены. Ab – альбит, Ms – мусковит, Spd – сподумен, Qu – кварц.

ны кристаллические индивиды апатита с конусо-видной формой (фиг. 9в).

*Циркон* в обеих разновидностях пород представлен идиоморфными бесцветными кристаллами размером до 50 мкм. Диагностирован он только в виде микровключений в кварце, сподумене, калиевом полевоом шпате, альбите, замещающем калиевый полевой шпат, и лимоните, замещающем пирит (фиг. 9г, д).

*Тантало-ниобаты* являются одними из главных рудных минералов в породах Алахинского штока. Они представлены минералами ряда танталит-колумбита и пироклора.

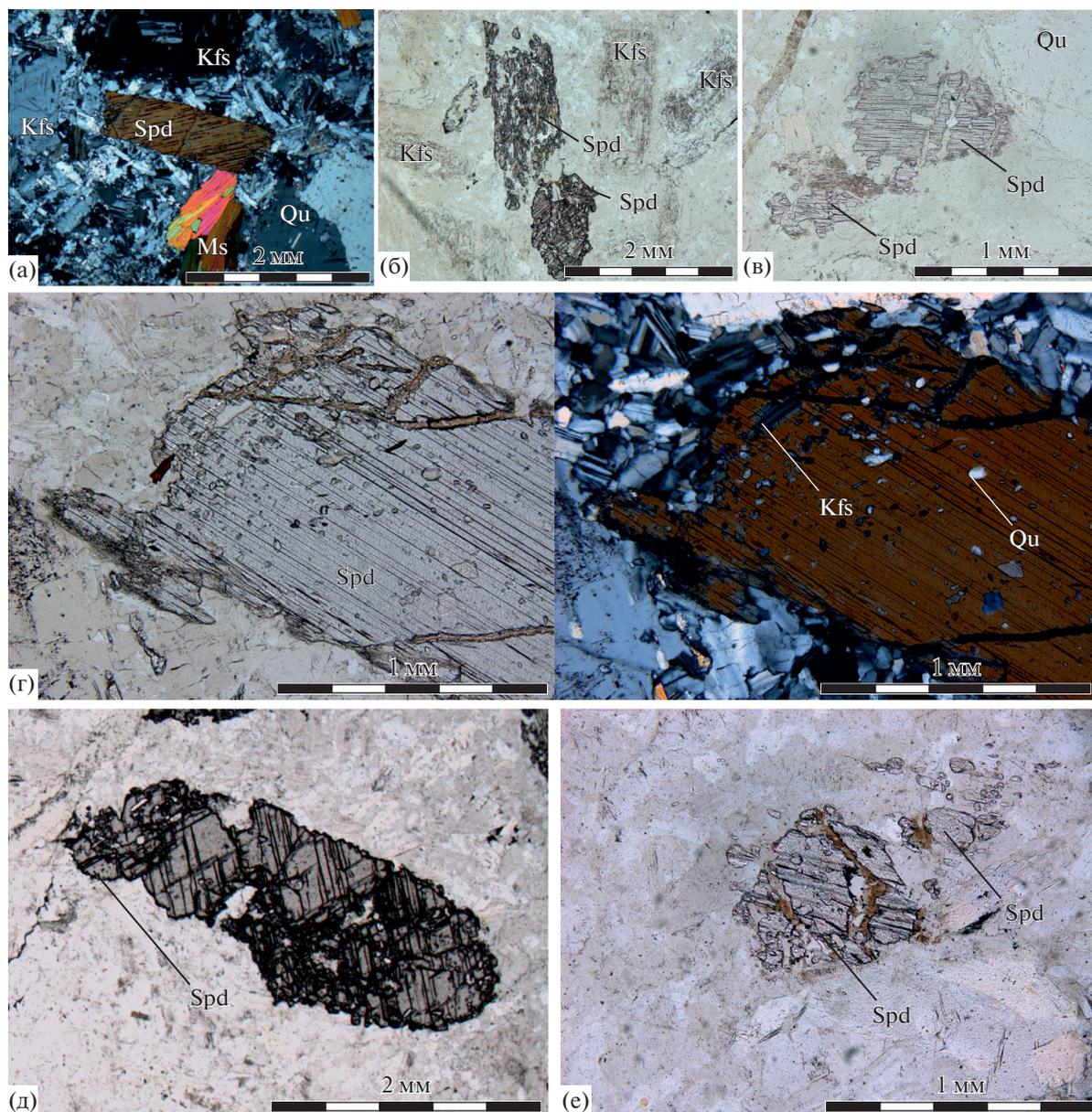
*Минералы ряда танталит-колумбита* широко распространены в обеих разновидностях пород Алахинского штока. Танталит-колумбиты представлены идиоморфными кристаллами размером до 0.3 мм, красновато-бурого до темно-бурого цвета. Кристаллы имеют таблитчатый и пластинчатый облик за счет уплощения по {010}. Они огранены габитусными гранями {010}, {110}, {001}. В обеих разновидностях пород танталит-колумбиты встречаются только в виде включений в по-

родообразующих минералах – кварце, мусковите, полевых шпатах, сподумене, а также в хлорите и лимоните, замещающих сподумен и пирит соответственно (фиг. 9д, е). Обнаружены сростки пластинчатых кристаллов танталит-колумбитов с микролитом (фиг. 9ж).

*Минералы ряда пироклора* в породах Алахинского штока представлены микровключениями (до 20 мкм) уранмикролита с характерной октаэдрической огранкой (фиг. 9з, и). Характерны как одиночные зерна уранмикролита, так и его сростки с танталит-колумбитом, причем в последнем случае уранмикролит обычно не имеет правильной кристаллографической огранки (фиг. 9ж, к). В мусковитовых альбититах уранмикролит встречается чаще, чем в мусковит-сподумен-калишпат-альбитовых гранит-порфирах.

#### *Составы породообразующих и акцессорных минералов*

Содержания главных компонентов в породообразующих и акцессорных минералах определя-



**Фиг. 7.** Вкрапленники сподумена (Spd) в породах Алахинского штока: а–г – мусковит-сподумен-калишпат-альбитовые гранит-порфиры, д, е – мусковитовые альбититы. Kfs – калиевый полевой шпат, Ms – мусковит, Qu – кварц. Фото а, г (справа) – николи скрещены, остальные – николи параллельны.

лись методом рентгеноспектрального микроанализа (EMPA и EDS), бария, лития, воды, фтора, хлора и бора в слюдах – методом вторично-ионной масс-спектрометрии (SIMS и TOF-SIMS).

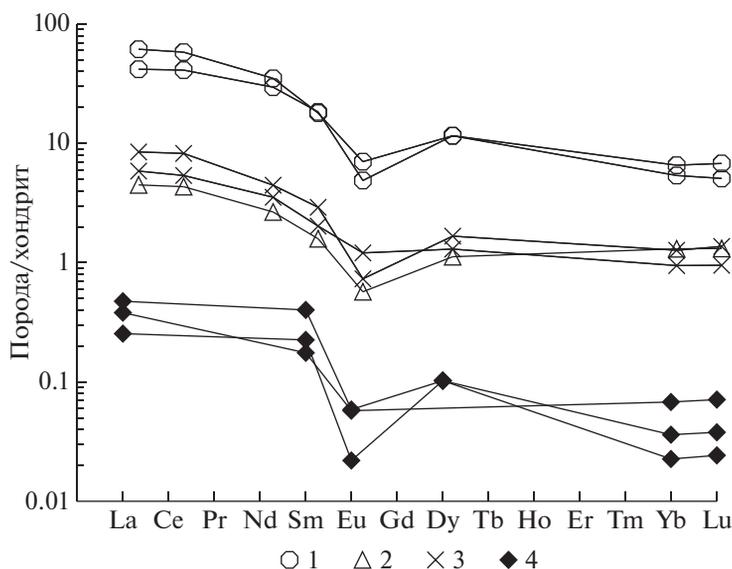
Для калиевых полевых шпатов из сподуменовых гранит-порфиров были проведены определения составов для порфировых вкрапленников и микровключений в кварце (табл. 2). Калиевый полевой шпат представлен ортоклазом (95–97% ортоклазового минала) с широкими вариациями содержаний  $\text{Na}_2\text{O}$  (0.28–0.53 мас. %), при этом наиболее высокие концентрации  $\text{Na}_2\text{O}$  характер-

ны для порфировых вкрапленников калишпата, а наиболее низкие – для микровключений в кварце (табл. 2). Все проанализированные зерна калиевого полевого шпата гранит-порфиров обладают высокими содержаниями  $\text{Rb}_2\text{O}$ , достигающими для вкрапленников 1.1 мас. %, для микровключений – 0.79 мас. % (табл. 2). Содержание  $\text{Cs}_2\text{O}$  в ряде проанализированных зерен варьирует от 0.07 до 0.14 мас. %, однако в большинстве из них – не превышает предела обнаружения аналитического метода (0.03 мас. %). Максимальные уровни концентрации ВаО в калиевых полевых шпатах из

**Таблица 1.** Содержание петрогенных (мас. %) и редких (г/т) элементов в представительных образцах пород Чиндагатауйского редкометаллоно-гранитного массива и Алахинского штока

Массив	Чиндагатауйский			Алахинский								
	биотитовый гранит	турмалин-мусковитовый лейкогранит	мусковитовый лейкогранит	мусковит-сподумен-калишпат-альбитовые гранит-порфиры								
№ пробы/компонент	5-405	3-706	3-707	A-1/35	A-3/36	22g-a	5-427	5-428	5-431	18g-a	36g	5-433
SiO <sub>2</sub>	70.04	73.60	74.74	73.65	71.82	72.81	71.93	72.27	72.22	66.94	67.48	66.34
TiO <sub>2</sub>	0.52	0.06	0.07	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.24	14.36	14.53	17.12	17.90	19.10	18.67	18.11	18.31	21.10	22.11	21.17
ΣFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.32	0.87	0.93	0.42	0.42	0.48	0.38	0.61	0.37	0.32	0.19	0.60
MnO	0.09	0.05	0.60	<0.03	0.04	0.07	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05
MgO	0.83	0.11	0.21	<0.01	<0.01	0.38	0.18	<0.01	<0.01	0.18	0.39	0.10
CaO	1.37	0.39	0.44	0.32	0.12	0.22	0.20	0.33	0.11	0.35	0.40	0.81
Na <sub>2</sub> O	3.57	4.09	3.81	7.27	5.19	5.14	7.13	6.05	4.74	9.18	8.40	9.20
K <sub>2</sub> O	4.65	5.55	4.11	0.43	3.31	1.07	0.72	1.73	2.53	0.69	0.20	1.19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.25	0.26	0.21	0.18	0.16	0.14	0.11	0.22	0.63	0.17	0.22	0.54
Li	174	258	293	3700	5100	5800	4600	5500	5500	2200	100	120
Rb	290	430	340	130	1900	600	310	630	1900	290	310	590
Cs	30	74	41	73	270	96	58	46	190	42	110	74
Be	4		16	100	41	31	18	65	66	7	7	7
Sr	110	54	14	80	11	14	28	50	4	64	112	68
Ba	240		<30	<30	<30							
Ta	2.9	5	5.3	130	150							
Nb	56		36	120	150	232	133	245	232	58	8	40
Zr	176		14	15	8	14	18	13	7	12	42	20
Y	55		28	2	51	15	7	16	69	14	4	19
ΣРЗЭ	220.61	20.47	17.11	0.50	0.27	0.35						

Примечание. Анализы выполнены в аналитических лабораториях ИГМ СО РАН; ΣРЗЭ – сумма редкоземельных элементов; “<” – содержание элемента ниже чувствительности аналитического метода; пустая клетка – отсутствие определения.



**Фиг. 8.** Нормированные по хондриту спектры распределения редкоземельных элементов для гранитов Чиндагатуйского редкометалльно-гранитного массива (1–3) и мусковит-сподумен-калишпат-альбитовых гранит-порфиров Алахинского штока (4). 1 – биотитовые граниты, 2 – мусковитовые лейкограниты, 3 – турмалин-мусковитовые лейкограниты, 4 – сподуменовые гранит-порфиры.

сподуменовых гранит-порфиров составляют 0.4 мас. %, а в подавляющем большинстве проанализированных зерен они оказались на уровне предела обнаружения аналитического метода (0.01–0.02 мас. %). Обращают на себя внимание повышенные содержания  $P_2O_5$  (0.29–0.65 мас. %) в порфировых вкрапленниках калишпата, сопоставимые с таковыми в полевых шпатах богатых фосфором кислых редкометалльных магматических пород Корнуолла (Англия) (London, 1992) и Восточно-Калгутинского дайкового пояса (Горный Алтай) (Sokolova, Smirnov, 2013), в то же время концентрации  $P_2O_5$  в калишпатах, представленных микровключениями в кварце, оказались на уровне предела обнаружения и ниже.

Для калиевых полевых шпатов из альбититов были исследованы составы микровключений калишпата в сподумене и составы калишпатов в интерстициях между зернами альбита (табл. 2). Калиевый полевой шпат альбититов представлен ортоклазом (95–97% ортоклазового минала), содержания  $Na_2O$  варьируют в диапазоне от 0.15 до 0.47 мас. %, что в целом укладывается в диапазон для калишпатов из гранит-порфиров. Содержание  $Rb_2O$  в калиевом полевом шпате альбититов варьирует в интервале 0.17–0.46 мас. %, что ниже,

чем в гранит-порфирах. Содержания  $Cs_2O$  в интерстициальном калиевом полевом шпате не превышают предела обнаружения, в то время как в калишпате, представленном включениями в реликтах сподумена, оно достигает 1.56 мас. %. Следует отметить высокие содержания  $BaO$  (до 0.56 мас. %). Уровни  $P_2O_5$  во всех проанализированных зернах интерстициального калиевого полевого шпата альбититов оказались ниже предела обнаружения (табл. 2).

Таким образом, калишпаты из обеих разновидностей пород – сподуменовых гранит-порфиров и мусковитовых альбититов, представленных ортоклазом, по содержаниям главных элементов-примесей ( $Rb_2O$ ,  $Cs_2O$ ,  $BaO$  и  $P_2O_5$ ) обнаруживают значимые различия в составах.

Плагноклазы мусковит-сподумен-альбитовых гранит-порфиров и мусковитовых альбититов отвечают альбитам (в среднем 1% анортитового минала). Главными примесями в плагноклазах являются  $Rb_2O$  (в среднем 0.12 мас. % – в гранит-порфирах и 0.11 мас. % – в альбититах),  $CaO$ , который варьирует в очень широких пределах (0.04–0.73 мас. % в гранит-порфирах и 0.16–0.32 мас. % в альбититах) и  $P_2O_5$  (в среднем 0.14 мас. % – в гранит-порфирах и 0.10 мас. % – в альбититах) (табл. 3).

**Фиг. 9.** Микрофотографии аксессуарных минералов, диагностированных в породах Алахинского штока. Минералы-хозяева: Ab – альбит, Kfs – калиевый полевой шпат, Ms – мусковит, Spd – сподумен. Микроминеральные включения: Py – пирит, Lm – лимонит, Ap – апатит, Zrn – циркон, Mcb – манганколумбит, Mta – мангантанталит, Umct – уранмикротит. Фото сделаны на сканирующем электронном микроскопе в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE).

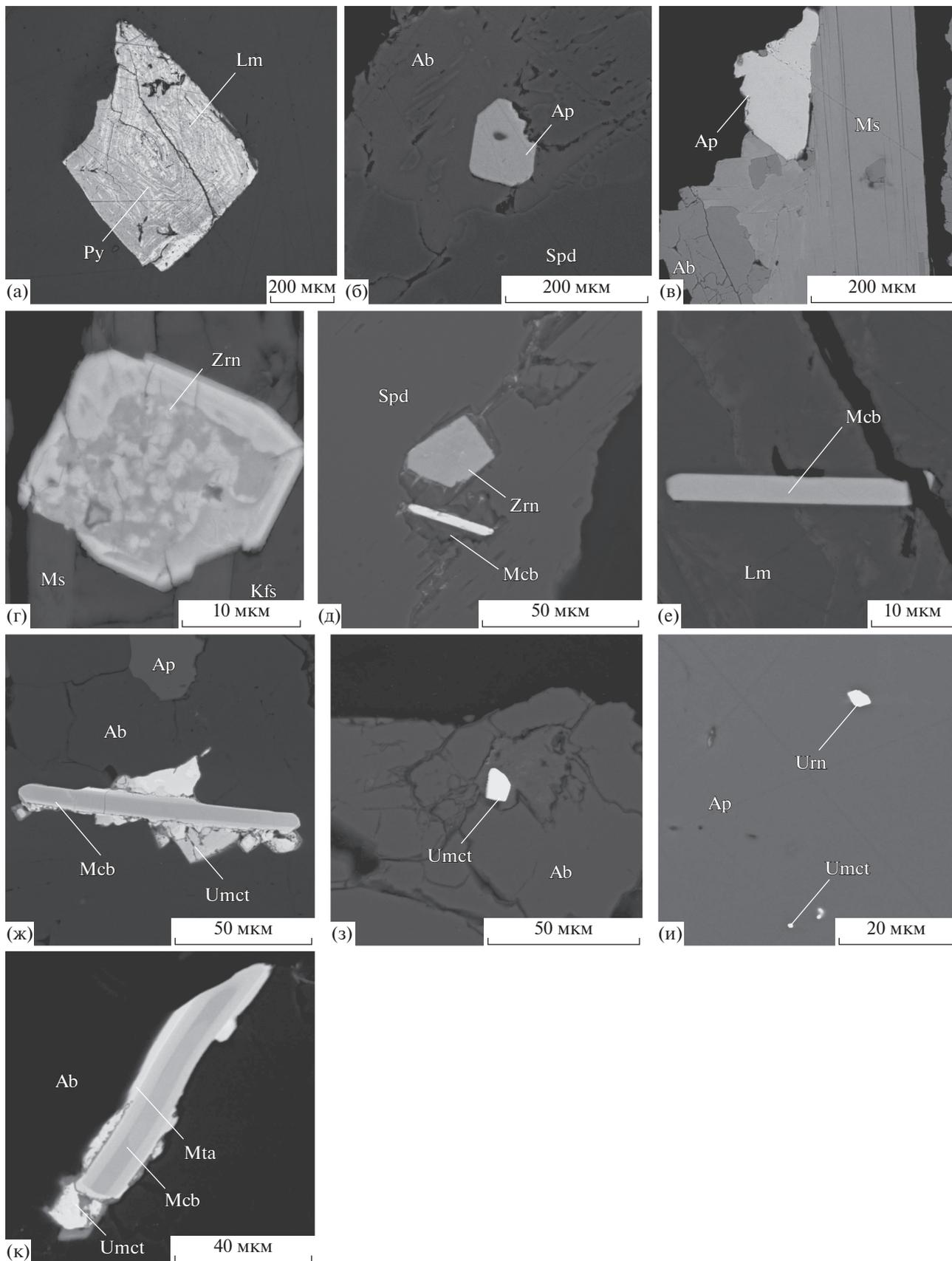


Таблица 2. Составы калиевых полевых шпатов из пород Алахинского штока, мас. %

Порода	Мусковит-сподумен-альбитовые гранит-порфиры								Мусковитовые альбититы							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SiO <sub>2</sub>	63.65	63.69	64.11	63.98	64.27	64.57	64.77	64.79	65.39	64.70	65.19	64.76	64.52	65.32	65.35	63.18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.35	18.49	18.42	18.60	18.24	18.09	17.98	18.23	18.43	18.46	18.40	18.40	18.29	18.35	18.32	19.33
CaO	0.15	—	0.15	—	0.12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.03
Na <sub>2</sub> O	0.35	0.36	0.30	0.43	0.31	0.36	0.36	0.38	0.36	0.36	0.28	0.37	0.47	0.36	0.15	0.42
K <sub>2</sub> O	15.71	15.49	15.67	15.70	15.60	15.76	15.90	15.77	15.95	15.86	16.15	15.99	16.04	15.84	16.16	14.57
Rb <sub>2</sub> O	0.58	0.88	0.73	0.67	0.64	0.69	0.29	0.37	0.27	0.24	0.21	0.27	0.30	0.25	0.46	0.17
Cs <sub>2</sub> O	0.09	0.08	—	—	0.07	—	—	0.09	—	—	—	—	0.11	—	—	1.56
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.62	0.46	0.36	0.56	0.11	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.94
BaO	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.10	0.34	0.52	0.20	0.43	0.30	0.39	0.20	0.00
Сумма	99.51	99.45	99.82	99.98	99.40	99.61	99.34	99.74	100.82	100.19	100.52	100.25	100.03	100.55	100.68	100.20
Кристаллохимические коэффициенты, рассчитанные на 8 атомов кислорода (количество ионов в пересчете на 8 атомов O)																
Si	2.96	2.97	2.98	2.96	3.00	3.01	3.01	3.01	3.01	3.00	3.00	3.00	3.00	3.01	3.01	2.93
Al	1.01	1.02	1.01	1.02	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.06
Ca	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.01	0.04
K	0.93	0.92	0.93	0.93	0.93	0.94	0.94	0.93	0.94	0.94	0.95	0.94	0.95	0.93	0.95	0.86
Rb	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
Cs	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
P	0.02	0.02	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
Молекулярные проценты основных миналов																
Ab	3.0	3.0	3.0	4.0	3.0	3.0	3.0	4.0	3.0	3.0	3.0	3.0	4.0	3.0	1.0	4.0
An	1.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Or	96.0	97.0	96.0	96.0	96.0	97.0	97.0	96.0	97.0	97.0	97.0	97.0	96.0	97.0	99.0	96.0

Примечание. 1—4 — порфиновые вкрапленники калиевого полевого шпата, 5—8 — микровключения калиевого полевого шпата в кварце, 9—12 — калиевый полевой шпат в интерстициях между зернами альбита, 13—16 — микровключения калиевого полевого шпата в сподумене, прочерк — содержание компонента ниже предела чувствительности аналитического метода.

Таблица 3. Составы плагиоклазов из пород Алахинского штока, мас. %

Порода/ компонент	Мусковит-сподумен-альбитовые гранит-порфиры										Мусковитовые альбититы													
	67.63	67.39	67.91	67.30	67.40	67.58	67.55	67.57	68.06	68.32	68.37	68.90	68.45	68.56	68.40	68.31	68.06	68.32	68.37	68.90	68.45	68.56	68.40	68.31
SiO <sub>2</sub>	19.55	19.36	18.91	19.30	19.24	19.17	19.06	19.25	19.81	19.64	19.57	19.40	19.48	19.66	19.35	19.81	19.64	19.57	19.40	19.48	19.66	19.35	19.35	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.26	0.23	0.07	0.19	0.15	0.43	0.13	0.24	0.22	0.28	0.08	—	0.10	0.10	0.10	0.22	0.28	0.08	—	0.10	0.10	0.10	0.10	
CaO	0.05	0.03	0.10	—	—	0.09	—	—	0.02	0.04	—	—	0.04	—	0.05	0.02	0.04	—	—	0.04	—	—	0.05	
SrO	11.27	11.47	11.78	11.80	11.58	11.39	11.59	11.49	11.15	11.14	11.08	11.33	10.53	11.24	11.43	11.15	11.14	11.08	11.33	10.53	11.24	11.22	11.43	
Na <sub>2</sub> O	0.08	0.08	0.07	0.08	0.06	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08	0.05	0.02	0.11	0.07	0.06	0.08	0.08	0.05	0.02	0.11	0.07	0.07	0.06	
K <sub>2</sub> O	0.11	0.13	0.17	0.14	0.14	0.10	0.09	0.11	0.12	0.12	0.12	0.10	0.08	0.15	0.09	0.12	0.12	0.12	0.10	0.08	0.15	0.16	0.09	
Rb <sub>2</sub> O	—	0.03	—	—	—	0.03	—	—	0.03	—	—	—	—	—	—	0.03	—	—	—	—	—	—	—	
Cs <sub>2</sub> O	0.20	0.29	0.13	0.13	0.20	—	0.17	0.04	0.30	—	0.13	—	0.07	0.11	0.10	0.30	—	0.13	—	0.07	0.11	0.07	0.10	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	99.16	99.03	99.20	98.99	98.82	98.88	98.68	98.78	99.80	99.65	99.42	99.80	98.89	99.92	99.52	99.80	99.65	99.42	99.80	98.89	99.92	99.39	99.52	
Сумма																								
Кристаллохимические коэффициенты, рассчитанные на 8 атомов кислорода (количество ионов в пересчете на 8 атомов O)																								
Si	2.98	2.98	3.00	2.98	2.98	2.99	2.99	2.99	2.98	2.99	3.00	3.01	3.01	2.99	3.00	2.98	2.99	3.00	3.01	3.01	2.99	3.00	3.00	3.00
Al	1.02	1.01	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.02	1.01	1.01	1.00	1.01	1.01	1.00	1.02	1.01	1.01	1.00	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00
Ca	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.96	0.98	1.01	1.01	0.99	0.98	1.00	0.99	0.95	0.95	0.94	0.96	0.90	0.95	0.97	0.95	0.95	0.94	0.96	0.90	0.95	0.95	0.95	0.97
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Rb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cs	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Молекулярные проценты основных миналов																								
Ab	98.0	99.0	99.0	99.0	99.0	97.0	99.0	99.0	99.0	98.0	99.0	100.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
An	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Or	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Примечание. Прочерк — содержание компонента ниже предела чувствительности аналитического метода.

**Таблица 4.** Составы сподуменов из пород Алахинского штока, мас. %

Порода/ компо- нент	Мусковит-сподумен-альбитовые гранит-порфиры								Мусковитовые альбититы							
	SiO <sub>2</sub>	64.79	64.57	64.45	64.41	64.65	64.81	64.82	64.37	65.49	65.41	65.16	65.52	65.60	65.51	65.41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.46	26.28	26.41	26.12	26.28	26.68	26.30	26.54	26.28	26.81	26.71	26.05	26.57	26.35	26.77	26.77
FeO	0.13	0.32	0.12	0.29	0.24	0.19	0.58	0.13	0.56	0.17	0.21	1.00	0.24	0.40	0.38	0.15
MnO	0.08	0.10	0.11	0.12	0.11	0.16	0.14	0.10	0.12	0.11	0.19	0.02	0.11	0.12	0.13	0.09
Na <sub>2</sub> O	0.14	0.14	0.12	0.11	0.15	0.14	0.11	0.14	0.12	0.10	0.09	0.05	0.12	0.14	0.12	0.08
Rb <sub>2</sub> O	0.09	0.13	0.09	0.14	0.08	0.13	0.11	0.09	0.10	0.10	0.11	0.10	0.12	0.09	0.08	0.10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	—	—	0.02	—	—	—	0.05	—	0.02	—	—	—	0.03	0.04	—	0.03
Сумма	91.76	91.63	91.49	91.22	91.56	92.19	92.16	91.48	92.74	92.80	92.51	92.76	92.80	92.68	92.98	92.97
Li <sub>2</sub> O*	8.79	8.74	8.61	8.81	8.79	8.54	8.68	8.50	9.08	8.77	8.67	9.21	9.01	9.06	8.71	8.96
Кристаллохимические коэффициенты (расчет на 1 атом Al)																
Si	2.08	2.09	2.07	2.09	2.09	2.06	2.09	2.06	2.11	2.07	2.07	2.13	2.10	2.11	2.07	2.08
Al	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Fe	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.02	0.00	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
Rb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Li	0.67	0.62	0.69	0.60	0.62	0.73	0.58	0.74	0.49	0.70	0.69	0.40	0.59	0.51	0.67	0.65
Кристаллохимические коэффициенты (расчет на 2 атома Si)																
Si	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Al	0.96	0.96	0.97	0.96	0.96	0.97	0.96	0.97	0.95	0.97	0.97	0.94	0.95	0.95	0.96	0.96
Fe	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00
Rb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Li	1.09	1.09	1.07	1.10	1.09	1.06	1.08	1.06	1.11	1.08	1.07	1.13	1.10	1.11	1.07	1.10

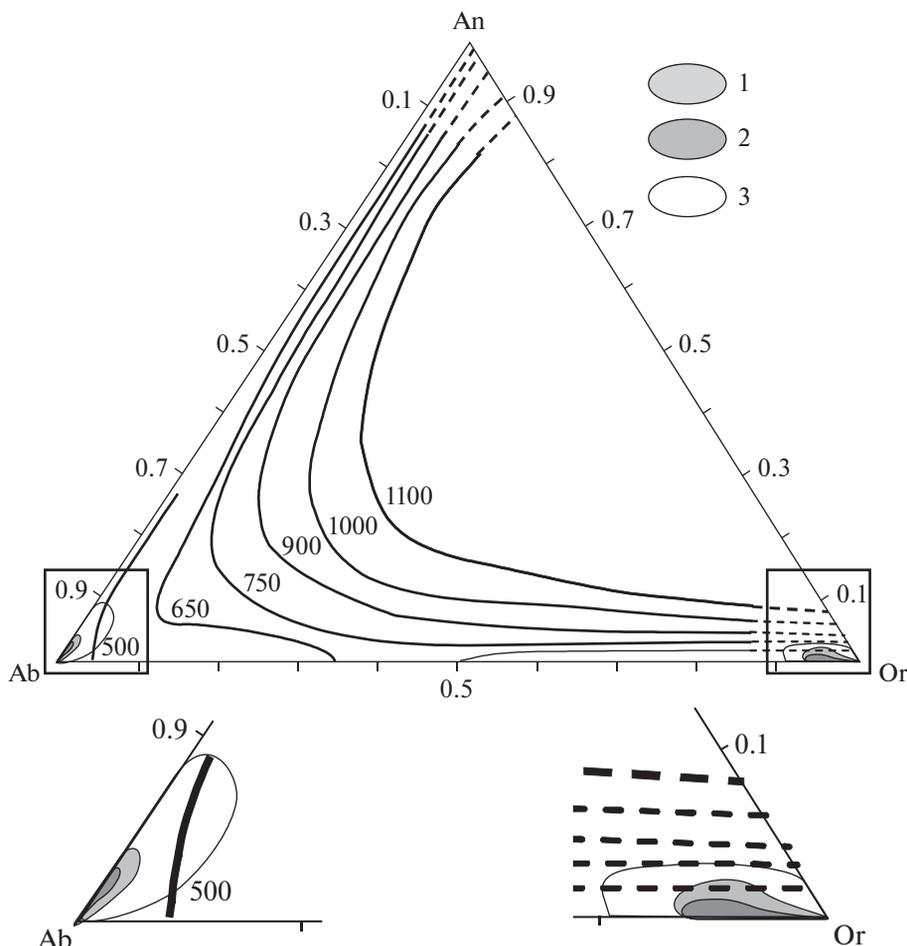
Примечание. \* — содержание рассчитано через баланс зарядов; прочерк — содержание компонента ниже предела чувствительности аналитического метода.

Составы калиевых полевых шпатов и плагиоклазов из пород Алахинского штока, вынесенные на треугольную диаграмму “альбит-анортит-ортоклаз”, формируют более компактные поля составов в сравнении с составами полевых шпатов из сподуменовых пегматитов ряда месторождений (Гранитные ..., 1997) (фиг. 10).

Составы *сподуменов* из мусковит-сподумен-альбитовых гранит-порфиры и мусковитовых альбититов близки к стехиометрическим, главные элементы-примеси — FeO, MnO, Na<sub>2</sub>O, Rb<sub>2</sub>O, при этом существенных отличий в составах сподуменов из обеих разновидностей пород не обнаружено (табл. 4).

*Слюды* мусковит-сподумен-альбитовых гранит-порфиры и альбититов Алахинского штока по составу отвечают низколитиевым мусковит-фенгитам (фиг. 11а, б). От мусковитов-вкрапленников в гранит-порфирах к мусковитам краевых зон из альбититов наблюдается увеличение содержания Li и двухвалентных катионов, занимающих октаэдрические позиции за счет уменьшения в них доли алюминия (фиг. 11б). Таким образом, составы наиболее поздних слюд оказываются смещенными к составам литиевых фенгит-мусковит-протолиитонитов.

По содержанию элементов-примесей слюды гранит-порфиры однородные, в то время как в слюдах альбититов характерна зональность:



**Фиг. 10.** Составы калиевых полевых шпатов и плагиоклазов из мусковит-сподумен-альбитовых гранит-порфиров и мусковитовых альбититов Алахинского штока в миналах “ортоклаз-анортит-альбит”. Линии солидуса проведены для  $P(\text{H}_2\text{O}) = 1.5$  кбар,  $T = 500\text{--}1100^\circ\text{C}$  (Barth, 1961; Seck, 1972). Поля составов полевых шпатов: 1 – составы полевых шпатов из мусковит-сподумен-альбитовых гранит-порфиров; 2 – составы полевых шпатов из мусковитовых альбититов, 3 – составы полевых шпатов из сподуменных пегматитов (Гранитные..., 1997).

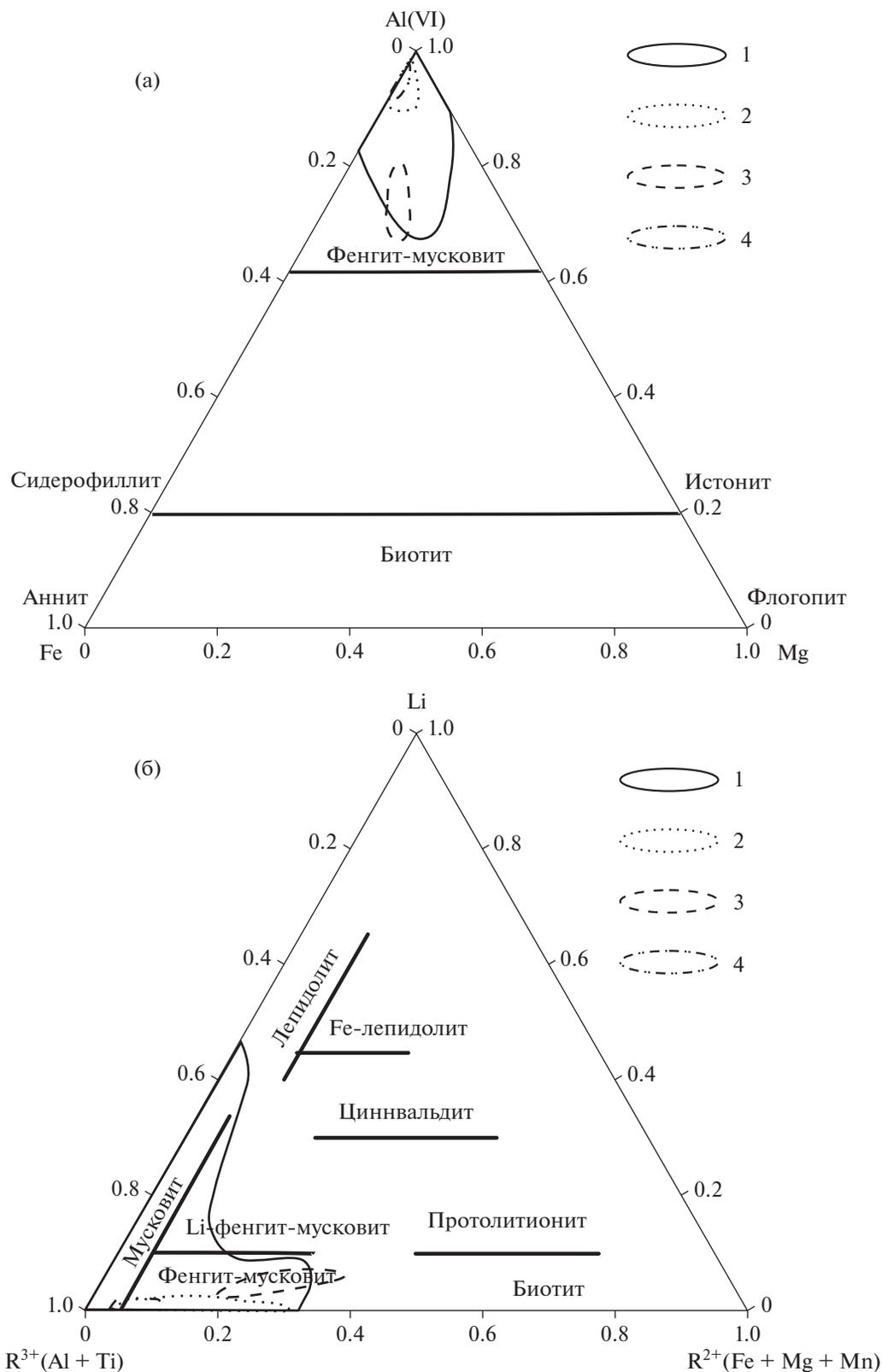
краевые зоны обогащены  $\text{Ti}_2\text{O}$  (до 0.35 мас. %),  $\text{MgO}$  (до 2.63 мас. %),  $\text{FeO}$  (до 6.24 мас. %),  $\text{MnO}$  (до 0.52 мас. %),  $\text{Li}_2\text{O}$  (до 0.82 мас. %),  $\text{Cs}_2\text{O}$  (до 0.86 мас. %),  $\text{F}$  (до 1.74 мас. %) Для слюд из обеих разновидностей пород характерны низкие содержания  $\text{CaO}$ ,  $\text{BaO}$  и  $\text{Cl}$  и повышенные –  $\text{V}$  (200–300 г/т) (табл. 5).

Помимо породообразующих минералов пород Алахинского штока были исследованы составы наиболее распространенных акцессорных минералов: апатита, танталит-колумбита, пироклора и циркона.

*Anatum* из редкометалльных пород Алахинского штока по химическому составу является  $\text{Mn}$ -содержащим  $\text{F}$ -апатитом, причем содержания  $\text{Mn}$  и  $\text{F}$  в апатите сподуменных гранит-порфиров несколько выше, чем в апатите мусковитовых альбититов.

*Танталит-колумбиты* сподуменных гранит-порфиров в большинстве случаев являются зональными: внешние зоны кристаллов по составу отвечают мангантанталиту, центральные – манганколумбиту, в то время как в мусковитовых альбититах отмечены только однородные манганколумбиты. От гранит-порфиров к альбититам значение отношения  $\text{Ta/Nb}$  в танталит-колумбитах снижается от 2.24 до 0.38. Главными примесями танталит-колумбитов пород Алахинского штока являются  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{WO}_3$  и  $\text{UO}_2$ . Содержания  $\text{UO}_2$  в танталит-колумбитах варьируют от 0.14 до 0.24 мас. % при средних – 0.18 мас. % Наиболее высокие концентрации  $\text{TiO}_2$  (в среднем 0.55 мас. %) и  $\text{WO}_3$  (в среднем 0.69 мас. %) отмечаются для танталит-колумбитов из мусковитовых альбититов.

*Пироклоры* сподуменных гранит-порфиров и мусковитовых альбититов Алахинского штока являются микролитами. В обоих типах пород мик-



**Фиг. 11.** Положение составов слюд на классификационных диаграммах Al-Fe-Mg (Foster, 1960) (а) и Li-R<sup>3+</sup>-R<sup>2+</sup> (Коваль и др., 1972) (б). Поля составов слюд: 1 – составы слюд сподуменовых пегматитов (Гранитные..., 1997; Загорский и др., 1990; Лапидес и др., 1977); 2–4 – составы слюд пород Алахинского штока: 2 – составы слюд мусковит-сподумен-альбитовых гранит-порфиров, 3 – составы краевых зон слюд мусковитовых альбититов, 4 – составы центральных зон слюд мусковитовых альбититов.

Таблица 5. Составы мусковитов из пород Алахинского штока, мас. %

Порода/ компонент	Мусковит-сподумен-альбитовые гранит-порфиры										Мусковитовые альбититы																		
	45.87	45.41	44.80	44.95	45.38	45.81	46.58	45.67	45.33	45.44	46.61	44.58	44.88	44.63	45.87	45.41	44.80	44.95	45.38	45.81	46.58	45.67	45.33	45.44	46.61	44.58	44.88	44.63	
SiO <sub>2</sub>	0.05	—	0.23	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.08	0.34	0.10	0.08	0.08	0.08	0.05	—	0.23	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.08	0.34	0.10	0.08	0.08	0.08	
TiO <sub>2</sub>	37.44	37.55	35.55	37.92	36.45	37.58	36.53	37.33	37.24	30.50	37.18	37.24	37.24	37.24	37.44	37.55	35.55	37.92	36.45	37.58	36.53	37.33	37.24	30.50	37.18	37.24	37.24	37.24	
FeO	1.48	2.03	1.71	1.53	1.66	1.59	2.27	1.84	1.84	4.48	1.41	1.84	1.84	1.84	1.48	2.03	1.71	1.53	1.66	1.59	2.27	1.84	1.84	4.48	1.41	1.84	1.84	1.84	
MnO	0.12	0.16	0.09	0.11	0.13	0.11	0.18	0.14	0.15	0.21	0.12	0.15	0.15	0.15	0.12	0.16	0.09	0.11	0.13	0.11	0.18	0.14	0.15	0.21	0.12	0.15	0.15	0.15	
MgO	—	—	0.78	0.10	—	—	0.04	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.78	0.10	—	—	0.04	—	—	—	—	—	—	—	
CaO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
BaO	0.001	0.0002	—	—	—	—	—	0.0003	0.000203	0.0221	—	0.0003	0.000203	0.0028	0.001	0.0002	—	—	—	—	—	0.0003	0.000203	0.0221	—	0.0028	—	—	—
K <sub>2</sub> O	9.68	9.68	9.52	9.82	9.52	10.05	9.66	9.89	9.62	10.09	9.63	9.62	9.62	9.62	9.68	9.68	9.52	9.82	9.52	10.05	9.66	9.89	9.62	10.09	9.63	9.62	9.62	9.62	9.62
Na <sub>2</sub> O	0.66	0.62	0.51	0.80	0.73	0.78	0.74	0.73	0.75	0.19	0.72	0.75	0.75	0.75	0.66	0.62	0.51	0.80	0.73	0.78	0.74	0.73	0.75	0.19	0.72	0.75	0.75	0.75	0.75
Li <sub>2</sub> O	0.11	0.14	—	—	—	—	—	0.12	0.14	0.39	—	0.12	0.14	0.13	0.11	0.14	—	—	—	—	—	0.12	0.14	0.39	—	0.12	0.13	0.13	0.13
Rb <sub>2</sub> O	0.47	0.49	0.95	0.51	0.43	0.46	0.41	0.45	0.40	0.47	0.54	0.40	0.40	0.42	0.47	0.49	0.95	0.51	0.43	0.46	0.41	0.45	0.40	0.47	0.54	0.40	0.40	0.42	0.42
Cs <sub>2</sub> O	0.027	0.023	0.15	—	0.05	—	—	0.019	0.023	0.55	—	0.019	0.023	0.23	0.027	0.023	0.15	—	0.05	—	—	0.019	0.023	0.55	—	0.019	0.23	0.23	0.23
F	0.28	0.22	0.48	0.22	0.26	0.22	0.26	0.31	0.30	1.02	—	0.31	0.30	1.58	0.28	0.22	0.48	0.22	0.26	0.22	0.26	0.31	0.30	1.02	—	0.31	1.58	1.58	1.58
B	0.033	0.031	—	—	—	—	—	0.033	0.032	0.023	—	0.033	0.032	0.032	0.033	0.031	—	—	—	—	—	0.033	0.032	0.023	—	0.033	0.032	0.032	0.032
Cl	0.015	—	—	—	—	—	—	0.002	0.012	0.004	—	0.002	0.012	—	0.015	—	—	—	—	—	—	0.002	0.012	0.004	—	0.002	0.012	—	—
H <sub>2</sub> O	5.57	4.64	—	—	—	—	—	4.62	4.85	5.53	—	4.62	4.85	4.64	5.57	4.64	—	—	—	—	—	4.62	4.85	5.53	—	4.62	4.85	4.64	4.64
Сумма	102.39	101.51	94.78	96.00	94.65	96.65	96.74	101.72	101.24	101.62	94.51	101.24	101.24	100.30	102.39	101.51	94.78	96.00	94.65	96.65	96.74	101.72	101.24	101.62	94.51	101.24	100.30	95.47	94.77
Кристаллохимические коэффициенты, рассчитанные кислородным методом на 11 атомов кислорода																													
Si	3.02	3.00	3.02	2.98	3.04	3.01	3.06	3.01	3.01	3.11	2.99	3.01	3.01	3.18	3.02	3.00	3.02	2.98	3.04	3.01	3.06	3.01	3.01	3.11	2.99	3.01	3.18	3.18	3.01
Ti	0.003	—	0.012	0.002	0.003	0.002	0.003	0.003	0.004	0.002	0.003	0.003	0.003	0.018	0.003	—	0.012	0.002	0.003	0.002	0.003	0.003	0.004	0.002	0.003	0.003	0.018	0.018	0.004
Al(IV)	0.98	1.00	0.98	1.02	0.96	0.99	0.94	0.99	0.99	0.89	0.89	0.99	0.99	0.82	0.98	1.00	0.98	1.02	0.96	0.99	0.94	0.99	0.99	0.89	0.89	0.99	0.82	0.82	0.004
Al(VI)	1.93	1.93	1.84	1.94	1.92	1.93	1.89	1.91	1.92	1.57	1.94	1.92	1.92	1.39	1.93	1.93	1.84	1.94	1.92	1.93	1.89	1.91	1.92	1.57	1.94	1.92	1.39	1.39	1.88
Fe	0.08	0.11	0.10	0.08	0.09	0.09	0.12	0.10	0.10	0.26	0.08	0.10	0.10	0.35	0.08	0.11	0.10	0.08	0.09	0.12	0.10	0.10	0.10	0.26	0.08	0.10	0.35	0.35	0.13
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01
Mg	0.00	0.00	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	0.24	0.00	0.00	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.24	0.24	0.00
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.81	0.82	0.82	0.83	0.81	0.84	0.81	0.83	0.81	0.88	0.82	0.81	0.81	0.89	0.81	0.82	0.82	0.83	0.81	0.84	0.81	0.83	0.81	0.88	0.82	0.81	0.89	0.89	0.84
Na	0.08	0.08	0.07	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.10	0.10	0.09	0.10	0.10	0.02	0.08	0.08	0.07	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.10	0.10	0.09	0.10	0.02	0.02	0.12
Rb	0.02	0.02	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Cs	0.001	0.00	0.004	0.00	0.001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.015	0.00	0.00	0.00	0.006	0.001	0.00	0.004	0.00	0.001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.015	0.00	0.00	0.006	0.006	0.00
F	0.06	0.05	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.22	0.05	0.06	0.06	0.34	0.06	0.05	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.22	0.05	0.06	0.34	0.34	0.07
Li	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	0.10	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.01	0.01	0.10	0.10	0.01

Примечание. Прочерк — содержание компонента ниже предела чувствительности аналитического метода, пустая клетка — отсутствие определения.

ролит обогащен  $UO_2$  (до 10.0 мас. % в альбититах и до 18.5 мас. % в гранит-порфирах). В гранит-порфирах отмечены зональные зерна микролитов: внешние зоны обогащены  $Nb_2O_5$  – до 22.19 мас. %,  $UO_2$  – до 20.17 мас. %,  $TiO_2$  – до 12.64 мас. %,  $PbO$  – до 1.91 мас. %,  $WO_3$  – до 0.62 мас. % и обеднены  $Ta_2O_5$ .

Составы цирконов из пород Алахинского штока близки к стехиометрическим. В цирконах проявлена зональность (наличие зон с различным содержанием  $HfO_2$  и  $UO_2$ ). Следует отметить повышенные содержания в цирконах  $HfO_2$  (до 11.6 мас. % – в гранит-порфирах и 4.7 мас. % – в альбититах) и  $UO_2$  (до 1.9 мас. % – в гранит-порфирах и до 2 мас. % – в альбититах).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### *Сравнительная минералогическая характеристика пород Алахинского штока и сподуменовых пегматитов*

Слюды сподуменовых пегматитов обычно представлены мусковитом или фенгит-мусковитом (см. фиг. 11а, б). Если для зональных блоковых редкометалльных пегматитов характерно изменение составов светлых слюд в ходе эволюции от мусковита к лепидолиту, то для слюд сподуменовых пегматитов, т.е. образований, близких к гранитам (Бескин, Шмакин, 1980; Бескин, Марин, 2011; Солодов, 1962), – увеличение роли фенгитового минала по мере повышения в них содержания лития (Лапидес и др., 1977). Характер изменения составов слюд в породах Алахинского штока хорошо согласуется с этими данными: их составы полностью располагаются в поле фенгит-мусковитов и образуют тренд в сторону более железистых разновидностей (см. фиг. 11б).

Плагиоклазы сподуменовых пегматитов обычно представлены альбитом с 7–8% анортитового минала и количеством ортоклазового компонента, обычно не превышающим 8–10% (Гранитные..., 1997). В мусковит-сподумен-альбитовых гранит-порфирах Алахинского штока плагиоклаз представлен практически чистым альбитом (в среднем 1% анортитового минала), а доля ортоклазового компонента варьирует в значительно более узких пределах – от 0.2 до 0.7%.

Сподумены из пород Алахинского штока по содержанию основных компонентов и главных примесей не проявляют существенных отличий от сподуменов других пегматитовых месторождений. Наблюдаемый дефицит лития в составах сподуменов из пород Алахинского штока характерен и для сподуменов из ряда месторождений сподуменовых пегматитов (Гранитные..., 1997; Загорский, Кузнецова, 1990; London, 2008; Deer *et al.*, 1963). Предполагается, что литий в сподумене за-

мещается не только катионами  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ , но и ионом гидроксония –  $H_3O^+$  (Гордиенко, 1979). Недостаток лития в структуре сподумена обусловлен замещением  $O_2$  на  $OH$ -диполь с образованием вакансии в позиции лития (Filip *et al.*, 2006).

*Танталит-колумбиты* из пород Алахинского штока, в сравнении с танталит-колумбитами редкометалльных пегматитов, включая зональные блоковые тела, оказались более обогащенными  $MnO$  и  $FeO$ . Кристаллы танталит-колумбитов из мусковит-сподумен-альбитовых гранит-порфиров зональные: внешние зоны отвечают составам манганколумбита, внутренние – мангантанталита с большим содержанием железа. Эта закономерность отмечается и для танталит-колумбитов сподуменовых пегматитов и является общей для редкометалльных гранитных пегматитов (Splide, Shearer, 1992; Abella *et al.*, 1995).

*Микролиты* из пород Алахинского штока в своем составе, так же как и микролиты других месторождений, проявляют дефицит катионов группы А, который объясняется как вхождением высоковалентных ионов, так и выщелачиванием  $Na$  и  $Ca$  при позднем изменении (Бородин, Назаренко, 1957; Горжевская и др., 1974; Lumpkin, Ewing, 1992). Повышение содержаний урана, титана, кальция, уменьшение – тантала и отрицательная корреляция урана и фтора в микролитах Алахинского штока согласуются с таковыми в микролитах сподуменовых пегматитов.

В *апатитах* пород Алахинского штока содержания марганца и фтора возрастают от мусковит-сподумен-альбитовых гранит-порфиров к мусковитовым альбититам, что характерно для редкометалльных пегматитов от ранних генераций к поздним (Гранитные..., 1997).

### *Последовательность минералообразования*

Данные онтогенических наблюдений в редкометалльных породах Алахинского штока систематизированы в схеме последовательности образования минералов и минеральных парагенезисов (фиг. 12).

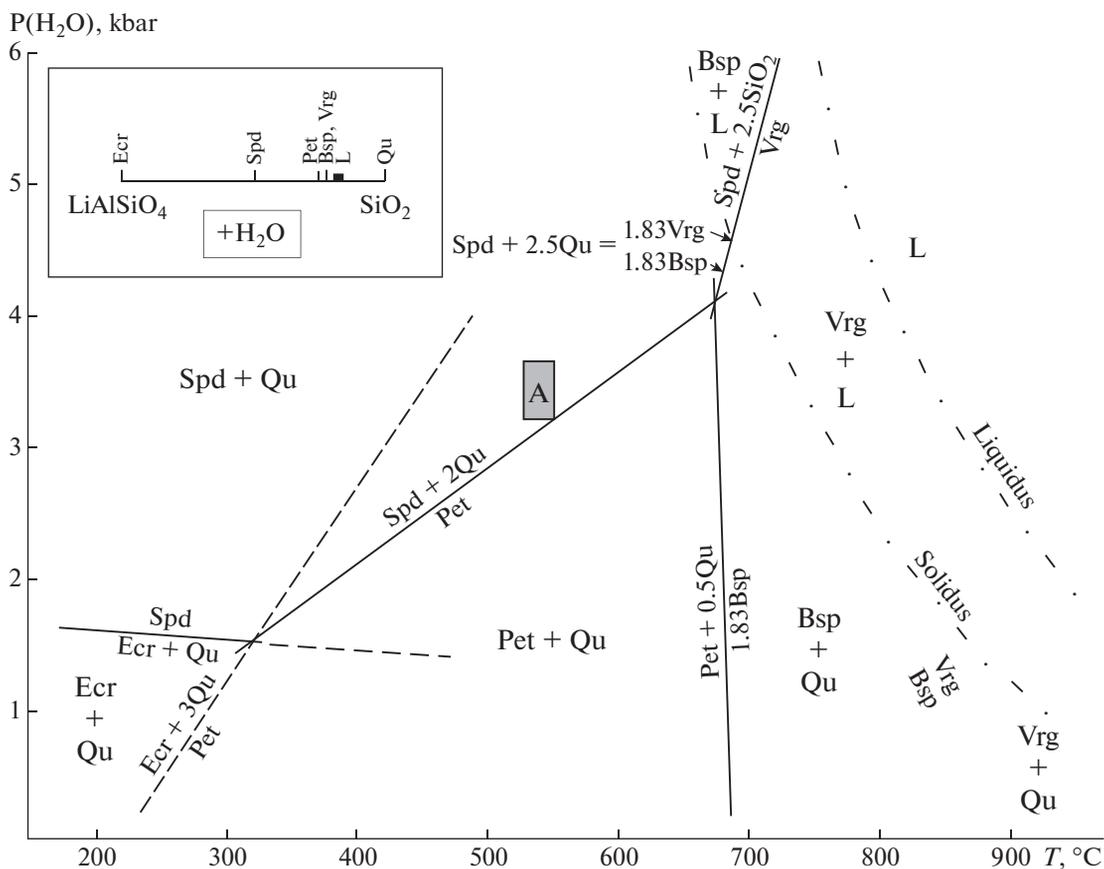
В *мусковит-сподумен-альбитовых гранит-порфирах* наиболее ранними минералами являются триплит и микролит, поскольку в них не было отмечено включений других минералов. Далее образуются аксессуарные апатит, танталит-колумбит, циркон и породообразующий сподумен, т.к. они содержат включения триплита и микролита. Отметим, что аксессуарные минералы не содержат включений породообразующих минералов. В краевых зонах кристаллов сподумена сосредоточены включения кварца, калиевого полевого шпата и альбита, в то время как вкрапленники кварца не содержат сподумен в виде минеральных

Минерал		Мусковит-альбит-сподуменовые гранит-порфиры	Мусковитовые альбититы
Первичные	Триплит	—————	
	Уранинит	—————	
	Уранмикролит	—————	—————
	Фторапатит	—————	—————
	Танталит-колумбит	—————	
	Циркон	—————	
	Пирит	—————	
	Сподумен	—————	—————
	Кварц	—————	—————
	Альбит	—————	—————
	Калиевый полевой шпат	—————	
	Мусковит	—————	—————
Вторичные	Хлорит		—————
	Лимонит		—————

**Фиг. 12.** Схема последовательности минералообразования в породах Алахинского штока. Черная черта – образование минерала, серая – растворение.

включений, а в калиевом полево м шпате отмечены единичные включения сподумена. В мусковит-сподумен-альбитовых гранит-порфирах альбит не обнаружен в виде вкрапленников, а присутствует либо в мелкозернистом матриксе, либо

в виде включений по периферическим зонам вкрапленников кварца. Следовательно, можно утверждать, что первыми после завершения образования аксессуарных минералов образуются вкрапленники сподумена, и только на заверша-



**Фиг. 13.** *PT*-фазовая диаграмма полей устойчивости литиевых алюмосиликатов (London, Burt, 1984). Состав фаз показан в левом верхнем углу. Серый прямоугольник — поле начала кристаллизации мусковит-сподумен-альбитовых гранит-порфиров Алахинского штока (Титов и др., 1999). Qu — кварц, Spd — сподумен, Ecr — эвкрипитит, Pet — петалит, Bsp — β-сподумен, Vrg — вирджилит, L — расплав.

ющих этапах их формирования кристаллизуются вкрапленники кварца и калиевого полевого шпата. Гранит-порфиры Алахинского штока характеризуются большим количеством вкрапленников (до 40 об. %), т.е. к моменту начала образования мелкозернистого матрикса порода была уже в значительной степени закристаллизована. Во время формирования основной массы гранит-порфиров вкрапленники продолжают кристаллизоваться — об этом говорит обилие минеральных включений по периферическим зонам вкрапленников. Самые поздние минералы гранит-порфиров — хлорит и лимонит — замещают сподумен и пирит соответственно.

В *мусковитовых альбититах* сподумен присутствует в виде изъеденных вкрапленников, что может интерпретироваться как растворение сподумена, образовавшегося на стадии кристаллизации гранит-порфира. Это подтверждается и химическим составом сподумена — существенных различий между сподуменом гранит-порфиров и альбититов нет. Калиевый полевой шпат раство-

ряется и замещается альбитом. Поскольку альбит гранит-порфиров и альбититов не обнаруживает различий в составе, можно утверждать, что он только перекристаллизовывается в мелкозернистом матриксе. Отличие состава краевых зон мусковита и их тесное срастание с альбитом и кварцем свидетельствуют о дорастании мусковита в твердой среде. В альбититах отсутствуют вкрапленники кварца с обилием минеральных включений альбита и калиевого полевого шпата. Характерны ксеноморфные зерна кварца практически без включений, вероятно, являющиеся реликтами вкрапленников кварца из гранит-порфиров, что указывает на растворение кварца. Такие акцессорные минералы, как уранинит и циркон, по-видимому, сохранились из гранит-порфиров, т.к. особенности их морфологии и химического состава идентичны для обеих разновидностей пород. Кристаллы танталит-колумбитов в гранит-порфирах зональные, а в альбититах — однородные, что объясняется перераспределением Ta и Nb в минералах при метасоматозе.

### Физико-химические параметры формирования пород Алахинского штока

Результаты исследования включений минералообразующих сред во вкрапленниках сподуменосодержащих гранит-порфиров Алахинского штока свидетельствуют, что эти породы имеют магматическое происхождение (Коваленко и др., 1998; Титов и др., 1999). Отмечается наличие во вкрапленниках кварца водных и углекислотных флюидных включений, сингенетичных с расплавленными, что указывает на то, что, по крайней мере, на стадии кристаллизации кварца магматический очаг был гетерогенным и, помимо силикатного расплава, содержал флюидную фазу (Титов и др., 1999). Порфировая структура пород предполагает кристаллизацию в малоглубинном магматическом очаге, однако наличие сподумена в породах Алахинского штока указывает на относительно высокие давления при их образовании. По оценкам А.В. Титова с соавторами (Титов и др., 1999), сподуменосодержащие гранит-порфиры Алахинского штока кристаллизуются при 530–550°C и 3.2–3.6 кбар, но эти параметры находятся ниже ликвидуса системы  $\text{LiAlSiO}_4\text{--SiO}_2\text{--H}_2\text{O}$  (фиг. 13) (London, Burt, 1984).

Наличие первично магматического мусковита, кристаллизующегося из расплава, содержащего около 0.1 мас. % фтора, позволяет считать, что процесс его образования протекал при давлениях не менее 3 кбар (Verma, 1988).

Низкое содержание  $\text{Na}_2\text{O}$  в калиевом полевошпате при отсутствии сингенетичных вкрапленников плагиоклаза позволяет предположить, что кристаллизация расплава протекала при температурах, не превышающих 650°C (Barth, 1961; Seck, 1972).

На фазовой диаграмме системы  $\text{LiAlSiO}_4\text{--SiO}_2\text{--H}_2\text{O}$  (London, Burt, 1984) приведенные *PT*-параметры соответствуют полю устойчивости сподумена в ассоциации с кварцем, однако точка *PT*-параметров находится существенно ниже линии ликвидуса в этой системе (см. фиг. 13). Можно предположить, что присутствие в системе фтора, бора, калия и натрия может существенно снизить температуру солидуса.

Процесс альбитизации протекал при еще более низкой температуре после завершения кристаллизации вкрапленников. Растворение сподумена указывает на то, что он оказывается вне поля своей устойчивости, при этом не наблюдается его замещение петалитом, эвкрипитом или литиевыми слюдами. Это свидетельствует о том, что в системе появляется фаза, концентрирующая литий, а именно – водный флюид, обогащенный натрием и фтором.

Таким образом, можно заключить, что в формировании минеральных ассоциаций мусковит-сподумен-альбитовых гранит-порфиров и альби-

титов Алахинского штока важную роль играла фаза водного флюида, отделившаяся при кристаллизации гранит-порфиров. Ее взаимодействие с гранит-порфирами привело к частичному выносу из них кремнезема, калия, кальция, железа, марганца, магния, редких щелочей, фтора, фосфора, урана, тантала и ниобия. При формировании альбититов кальций, фосфор, бор, тантал и уран осаждались, формируя минеральные ассоциации с участием апатита и микролита. В меньшей степени удерживались железо, магний, марганец, редкие щелочи и фтор, которые расходовались на образование слюд. Остальные компоненты, по-видимому, удалялись за пределы массива и участвовали в формировании грейзенов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Алахинский шток сподуменовых гранит-порфиров с альбититовой фацией представляет собой самостоятельное интрузивное тело, вскрытое в апикальной части. Судя по результатам площадного опробования, этот шток имеет квазиоднородный характер, что свидетельствует в пользу существования самостоятельной литиевой кремнекислой магмы.

2. Результаты минералогических исследований позволяют утверждать, что набор акцессорных минералов в сподуменовых гранит-порфирах и мусковитовых альбититах Алахинского штока одинаков, за исключением триплита и пирита, встреченных только в гранит-порфирах.

3. Сопоставление химизма главных породообразующих минералов сподуменовых гранит-порфиров Алахинского штока и сподуменовых пегматитов ряда известных месторождений обнаруживает значительное сходство, что предполагает близкий петрогенетический механизм их формирования при крайне низких термодинамических параметрах ( $P = 3.2\text{--}3.6$  кбар,  $T = 530\text{--}550^\circ\text{C}$ ) с участием водной фазы.

4. Формирование минеральных ассоциаций мусковитовых альбититов Алахинского штока связано с постмагматическим метасоматическим преобразованием сподуменосодержащих гранит-порфиров, имеющих магматический генезис. Это преобразование сопровождается растворением магматических сподумена и кварца, замещением калиевого полевого шпата альбитом и переотложением тантало-ниобатов, в результате чего формируется существенно альбитовая минеральная ассоциация, в которой альбит ассоциирует с новообразованным кварцем, небольшим количеством слюды, апатитом и тантало-ниобатами.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят д.г.-м.н. **В.Е. Загорского** за обсуждение отдельных разделов статьи, д.т.н. Т.С. Юсупова за помощь в проведении минералогических исследований. Особую благодарность авторы статьи выражают аналитикам В.Н. Королюку и Л.Н. Поспеловой (рентгеноспектральный анализ), А.Т. Титову (сканирующая электронная микроскопия), Н.Г. Кармановой и Н.М. Глухой (рентгенофлуоресцентный анализ), И.В. Николаевой (масс-спектрометрический анализ).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 15-17-10010), результаты исследований С.З. Смирнова и И.Ю. Анниковой получены в рамках Программ повышения конкурентоспособности Томского и Новосибирского государственных университетов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бескин С.М., Марин Ю.Б.* Геодинамические типы редкометалльного гранитного магматизма // Граниты и процессы рудообразования. М.: ИГЕМ РАН, 2011. С. 30–31.
- Бескин С.М., Шмакин Б.М.* Альбит-сподуменовые пегматиты как разновидность редкометалльных гранитов // Доклады АН СССР. 1980. Т. 252. № 3. С. 684–687.
- Большой Алтай (геология и металлогения). Геологическое строение / Под ред. Щербы Г.Н. Алматы: Гылым, 1998. Кн. 1.
- Большой Алтай (геология и металлогения). Металлогения / Под ред. Щербы Г.Н. Алматы: РИО ВАК РК, 2000. Кн. 2.
- Бородин Л.С., Назаренко И.И.* Об отступлениях минералов группы пироклора от типовой формулы  $A_2B_2X$  и о роли конституционной воды в кристаллической решетке пироклора // Доклады АН СССР. 1957. Т. 115. № 4. С. 783–786.
- Буслов М.М., Ватанабе Т., Смирнова Л.В. и др.* Роль сдвигов в позднепалеозойско-раннемезозойской тектонике и геодинамике Алтае-Саянской и Восточно-Казахстанской складчатых областей // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 1–2. С. 49–75.
- Владимиров А.Г., Пономарева А.П., Шокальский С.П. и др.* Позднепалеозойский–раннемезозойский гранитоидный магматизм Алтая // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. № 4. С. 715–729.
- Владимиров А.Г., Выставной С.А., Титов А.В. и др.* Петрология раннемезозойских редкометалльных гранитов юга Горного Алтая // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 7. С. 901–916.
- Владимиров А.Г., Крук Н.Н., Руднев С.Н. и др.* Геодинамика и гранитоидный магматизм коллизионных орогенов // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 12. С. 1321–1338.
- Владимиров А.Г., Крук Н.Н., Хромых С.В. и др.* Пермский магматизм и деформации литосферы Алтая как следствие термических процессов в земной коре и мантии // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 7. С. 621–636.
- Владимиров А.Г., Ляхов Н.З., Загорский В.Е. и др.* Литиевые месторождения сподуменовых пегматитов Сибири // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20. № 1. С. 3–20.
- Гордиенко В.В.* Эволюция вещественного состава редкометалльных гранитных пегматитов и ее возможные причины // Записки ВМО. 1979. Ч. 108. Вып. 2. С. 165–181.
- Горжевская С.А., Сидоренко Г.А., Гинзбург А.И.* Титанотантало-ниобаты (свойства, особенности состава и условия образования). М.: Недра, 1974.
- Гранитные пегматиты. Т. 2. Редкометалльные пегматиты / Отв. редактор Шмакин Б.М. Новосибирск: Наука, 1997.
- Гусев Г.С., Гуцин А.В., Межеловский Н.В. и др.* Два типа редкометалльного оруденения на территории России: геодинамические модели формирования // Разведка и охрана недр. 2012. № 2. С. 38–43.
- Дьячков Б.А.* Литиеносные месторождения Восточного Казахстана // Литий России: Минерально-сырьевые ресурсы, инновационные технологии, экологическая безопасность: Матер. Всерос. науч.-практ. конф. с международ. участием. Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2011. С. 42–48.
- Дьячков Б.А., Майорова Н.П., Щерба Г.Н. и др.* Гранитоидные и рудные формации Калба-Нарымского пояса (Рудный Алтай) // Алматы: Гылым, 1994.
- Дьячков Б.А., Майорова Н.П., Рахимбаева Б.Б.* Редкометалльные рудно-магматические системы и генетические типы месторождений Калба-Нарымской зоны Восточного Казахстана // Рудно-магматические системы орогенных областей. Ташкент, 2010. С. 331–337.
- Загорский В.Е., Кузнецова Л.Г.* Геохимия сподуменовых пегматитов и щелочно–редкометалльных метасоматитов // Новосибирск: Наука, 1990.
- Загорский В.Е., Владимиров А.Г., Макагон В.М. и др.* Крупные поля сподуменовых пегматитов в обстановках рифтогенеза и постколлизийных сдвигово-раздвиговых деформаций континентальной литосферы // Геология и геофизика. 2014. № 2. С. 303–322.
- Ильин В.А., Халилов В.А., Козлов М.С. и др.* О возрасте Алахинского штока Горного Алтая по данным U–Pb и Rb–Sr датирования // Геология и геофизика. 1994. № 1. С. 79–81.
- Коваленко В.И., Царева Г.М., Кононкова Н.Н. и др.* Главные компоненты, элементы-примеси и вода в магме сподуменовых гранитов (данные изучения расплавных включений) // ДАН. 1998. Т. 362. С. 816–820.
- Коваль П.В., Коваленко В.И., Кузьмин М.И. и др.* Минеральные парагенезисы, состав и номенклатура слюд редкометалльных альбитсодержащих гранитоидов // Докл. АН СССР. 1972. Т. 202. № 5. С. 1174–1177.
- Кудрин В.С., Ставров О.Д., Шурига Т.Н.* Новый сподуменовый тип танталоносных редкометалльных гранитов // Петрология. 1994. Т. 2. № 1. С. 88–95.
- Лапидес И.Л., Коваленко В.И., Коваль П.В.* Слюды редкометалльных гранитоидов. Новосибирск: Наука, 1977.
- Ляхович В.В.* Петрографо-минералогические особенности амблигонит- и сподуменсодержащих гранитов // Изв. АН СССР, сер. геол. 1963. № 3. С. 63–82.

- Солодов Н.А.* Внутреннее строение и геохимия редкометалльных гранитных пегматитов. М.: Изд-во АН СССР, 1962.
- Титов А.В., Шведенков Г.Ю., Выставной С.А.* Параметры кристаллизации и эволюции редкометалльных гранитных магм Южного Алтая (результаты изучения включений в минералах) // ДАН. 1999. Т. 368. № 5. С. 671–675.
- Шокальский С.П., Бабин Г.А., Владимиров А.Г. и др.* Корреляция магматических и метаморфических комплексов западной части Алтае-Саянской складчатой области. Новосибирск: СО РАН, 2000.
- Abella P.A., Cordomi M.C., Draper J.-C.M.* Nb–Ta-minerals from the pegmatite field, Eastern Pyrenees: distribution and geochemical trends // Mineralogy and Petrology. 1995. V. 55. Is. 1–3. P. 53–69.
- Barth T.F.* The feldspar lattices as solvent of foreign ions // Inst. Lucas Mallada, Cursos y Conferencias, f. 8. Madrid, 1961. P. 3–8.
- Berman R.G.* Internally-consistent thermodynamic data for stoichiometric minerals in the system  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$  // J. Petrology. 1988. V. 29. P. 445–522.
- Deer W.A., Howie R.A., Zussman J.* Rock-forming Minerals. 1963. V. 2.
- Filip J., Novák M., Beran A., Zbořil R.* Crystal chemistry and OH defect concentrations in spodumene from different granitic pegmatites // Physics and Chemistry of Minerals. 2006. V. 32. P. 733–746.
- Foster M.D.* Interpretation of composition of trioctahedral micas // U.S. Geol. Survey Prof. Paper. 1960. 354–B. P. 11–48.
- Foster M.D.* Interpretation of composition of lithium micas // U.S. Geol. Survey Prof. Paper. 1960. 354–E. P. 115–146.
- Kostitsyn Y.A., Vystavnoy S.A., Vladimirov A.G.* Age and genesis of the spodumene-bearing granites of the SW Altai (Russia): an isotopic and geochemical study // Acta Universitatis Carolinae. Geologica. 1998. V. 42(1). P. 60–63.
- Kremenetsky A.A.* The rare-metal pegmatite deposits of Mongolian Altai, Eastern Kazakhstan and Cina // Granite-related ore deposits of Central Kazakhstan and adjacent areas. St. Petersburg, 1996. P. 243–256.
- Liu W., Liu C.Q., Masuda A.* Complex trace-element effects of mixing-fractional crystallization composite processes: applications to the Alraer granite pluton, Altay Mountains, Xingjiang, Northwestern China // Chemical Geology. 1997. V. 135. P. 103–124.
- London D.* Phosphorus in S-type magmas: The  $\text{P}_2\text{O}_5$  content of feldspars from peraluminous granites, pegmatites and rhyolites // American Mineralogist. 1992. V. 77. P. 126–145.
- London D.* Pegmatites // Can. Mineral. Spec. Publ. 2008. V. 10. P. 347.
- London D., Burt D.M.* Experimental phase equilibria in the system  $\text{LiAlSiO}_4-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ : a petrogenetic grid for lithium-rich pegmatites // American Mineralogist. 1984. V. 69. P. 995–1004.
- Lumpkin G.R., Ewing R.C.* Geochemical alteration of pyrochlore group minerals: Microlite subgroup // American Mineralogist. 1992. V. 77. P. 179–188.
- Seck H.A.* The influence of pressure on the alkali feldspar solvus from peraluminous and persilicic materials // Fortschritt. Mineral. 1972. V. 49. P. 31–49.
- Sokolova E.N., Smirnov S.Z.* Crystallization of P-rich minerals from the high phosphorus rare-metal magma of East-Kalguty Dyke Belt (S. Altay, Russia) // Mineralogical Magazine. Goldschmidt 2013 (Florence, Italy, 25–30 August 2013), 2013. V. 77. № 5. P. 2232.
- Splide M.N., Shearer C.K.* A comparison of tantalum-niobium oxide assemblages in two mineralogically distinct rare-element granitic pegmatites, Black Hills, South Dakota // Can. Mineral. 1992. V. 30. P. 719–737.
- Wang D.H., Chen Y.C., Xu Z.G., Li T.D., Fu X.J.* The ore-forming series and law in Altay ore-forming province. Yuzanineng Publish House, Beijing, 2002, 493 p. (in Chinese).
- Zhu Y.-F., Yishan Zeng, Libing Gu.* Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite No. 3 vein and related granites in the Keketuohai region, Altay Mountains, northwest China // Journal of Asian Earth Sciences. 2006. V. 27. P. 61–77.