

## Геология и минералогия Ново-Ахмировского месторождения литиевых топаз-циннвальдитовых гранитов (Восточный Казахстан)

© 2019 г. И. Ю. Анникова<sup>1,2,3</sup>, А. Г. Владимиров<sup>1,2,3</sup>, С. З. Смирнов<sup>1,2,3</sup>, Т. А. Ойцева<sup>4</sup>,  
Е. И. Михеев<sup>1,2</sup>, Е. Н. Джес<sup>4</sup>, А. В. Травин<sup>1,2,3</sup>, Б. А. Дьячков<sup>4,5</sup>,  
В. И. Маслов<sup>6</sup>, И. Ф. Гертнер<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3,  
e-mail: ira99@igm.nsc.ru, iyuannikova@mail.ru

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

<sup>3</sup>Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

<sup>4</sup>Восточно-Казахстанский государственный технический университет, 070004, Республика Казахстан,  
г. Усть-Каменогорск, ул. Протожанова, 69

<sup>5</sup>Алтайский геолого-экологический институт, 692024, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск,  
ул. К. Либкнехта, 21

<sup>6</sup>ТОО “GEO.KZ”, 070004, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, просп. Победы, 3/2

Поступила в редакцию 06.08.2018 г., принята к печати 16.11.2018 г.

**Объект исследования.** Ново-Ахмировское литиеносное месторождение в Рудном Алтае (Восточный Казахстан), представленное интрузивным штоком топаз-циннвальдитовых гранитов, локализовано в пределах уникального по протяженности (более 1000 км) Калба-Нарым-Коктогайского литий-танталового редкометалльно-гранитного пояса, входящего в состав Алтайской аккреционно-коллизонной системы. **Материалы и методы.** Микроскопическое описание шлифов проведено классическим методом на основе коллекции геологических образцов, отобранных нами в ходе полевых исследований на Ново-Ахмировском штоке в 2016 г. Определение содержания петрогенных элементов выполнено методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием установки СРМ-25; концентрации редких и редкоземельных элементов определялись на масс-спектрометре Element фирмы Finnigan. Содержание главных компонентов в минералах установлено рентгеноспектральным микроанализом на электронном анализаторе Camebax Micro Jeol JXA-8100. **Результаты.** Руды представлены массивными до слабопорфировидных лейкократовыми гранитами, сложенными горошковидным кварцем (30–40), альбитом (25–40), микроклином (15–35%), литиевой слюдой, варьирующей по составу от циннвальдита до лепидолита (до 10) и топазом (до 5%). Судя по прогнозным оценкам, Ново-Ахмировское месторождение является, по сути дела, бедным литиевым месторождением (содержание  $\text{Li}_2\text{O}$  – 0.2–0.4 мас. %, прогнозные запасы – 110 тыс. т  $\text{Li}_2\text{O}$ ), однако его рудогенерирующий потенциал до сих пор не доизучен и не востребован, несмотря на благоприятную инфраструктуру и непосредственную близость к горно-обогатительным и химико-металлургическим производствам г. Усть-Каменогорска. Приводятся новые данные по геологическому строению, возрасту, вещественному составу и условиям формирования топаз-циннвальдитовых гранитов Ново-Ахмировского интрузивного штока, а также их сравнительный анализ с топаз-биотитовыми гранитами массива Чёрная Сопка (0.6–0.7 мас. %  $\text{Li}_2\text{O}$  в протолитионитовых слюдах) и сподуменовыми гранит-порфирами Алахинского штока ( $\text{Li}_2\text{O}$  – 0.9–1.1 мас. %). **Выводы.** Сделан вывод, что перспективы освоения этих уникальных “внепегматитовых” литиевых месторождений требуют постановки глубокого разведочного бурения, минералого-технологического исследования керна скважин и переоценки геолого-экономической рентабельности их освоения.

**Ключевые слова:** литий, редкометалльные граниты, U/Pb, Rb/Sr, Ar/Ar изотопное датирование, геохимия, минералогия, термометрия расплавных включений, Алтай, Россия, Казахстан

**Для цитирования:** Анникова И.Ю., Владимиров А.Г., Смирнов С.З., Ойцева Т.А., Михеев Е.И., Джес Е.Н., Травин А.В., Дьячков Б.А., Маслов В.И., Гертнер И.Ф. (2019) Геология и минералогия Ново-Ахмировского месторождения литиевых топаз-циннвальдитовых гранитов (Восточный Казахстан). *Литосфера*, 19(2), 304–326. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-2-304-326

**For citation:** Annikova I.Yu., Vladimirov A.G., Smirnov S.Z., Oitseva T.A., Mikheev E.I., Jes E.N., Travin A.V., D'yachkov B.A., Maslov V.I., Gertner I.F. (2019) Geology and mineralogy of the Novo-Akhmirovskoe deposit of lithium topaz-zinnwaldite granites (East Kazakhstan). *Litosfera*, 19(2), 304–326. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-2-304-326

## Geology and mineralogy of the Novo-Akhmirovskoe deposit of lithium topaz-zinnwaldite granites (East Kazakhstan)

Irina Yu. Annikova<sup>1,2,3</sup>, Alexandr G. Vladimirov<sup>1,2,3</sup>, Sergei Z. Smirnov<sup>1,2,3</sup>, Tatiyana A. Oitseva<sup>4</sup>,  
Evgeny I. Mikheev<sup>1,2</sup>, Elena N. Jes<sup>4</sup>, Alexei V. Travin<sup>1,2,3</sup>, Boris A. D'yachkov<sup>4,5</sup>,  
Vladimir I. Maslov<sup>6</sup>, Igor' F. Gertner<sup>3</sup>

<sup>1</sup>V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, 3 Koptyug ave., Novosibirsk 630090, Russia,  
e-mail: ira99@igm.nsc.ru, iyuannikova@mail.ru

<sup>2</sup>Novosibirsk State University, 2 Pirogov st., Novosibirsk 630090, Russia

<sup>3</sup>Tomsk State University, 36 Lenin av., Tomsk 634050, Russia

<sup>4</sup>East Kazakhstan Technical State University, 69 A.K. Protozanov st., Ust-Kamenogorsk 070004,  
Republic of Kazakhstan

<sup>5</sup>K.I. Satpayev Altai geological and ecological institute, 21 Karl Liebknecht st., Ust-Kamenogorsk 692024,  
Republic of Kazakhstan

<sup>6</sup>TOO "GEO.KZ", 3/2 Pobeda ave., Ust-Kamenogorsk 070004, Republic of Kazakhstan

Received 06.08.2018, accepted 16.11.2018

**Research subject.** The Novo-Akhmirovskoe lithium-bearing deposit in the East Kazakhstan region, which is represented by an intrusive layer of topaz-zinnwaldite granites, is located within of the Kalba-Narym-Koktogai lithium-tantalum rare-metal-granite belt. Being part of the Altai collision system, this belt is considered unique in terms of its length (more than 1000 km). Ores in the Novo-Akhmirovskoe deposit are represented by massive to low porphyry leucocratic granites composed of quartz (30–40%), albite (25–40%), microcline (15–35%), lithium mica varying in composition from zinnwaldite to lepidolite (up to 10%) and topaz (up to 5%). According preliminary estimates, the Novo-Akhmirov deposit is factually a poor lithium deposit with the Li<sub>2</sub>O content of 0.2–0.4 wt % and the estimated Li<sub>2</sub>O reserves of 110 thousand tones. Despite the favourable infrastructure and close proximity of this stock to Ust-Kamenogorsk mining and chemical-metallurgical enterprises, its ore-generating potential has not been sufficiently studied. **Materials and Methods.** In this research, we obtained new data on the geological structure, age, mineral composition and formation conditions of topaz-zinnwaldite granites in the Novo-Akhmirovskoe deposit. In addition, a comparative analysis of these ores with the topaz-biotite granites of the Black Sopka massif (0.6–0.7 wt % Li<sub>2</sub>O in protolith) and spodumene granite porphyries of the Alakha stock (Li<sub>2</sub>O = 0.9–1.1 wt %) was conducted. **Results and Discussion.** It is concluded that the development of this unique non-pegmatite lithium-bearing deposit requires deep exploratory drilling, mineralogical and technological research of core samples and reconsideration of economic efficiency parameters.

**Keywords:** lithium, rare-metal granites, U-Pb, Rb-Sr, Ar-Ar isotope dating, geochemistry, mineralogy, melt inclusion thermometry, Altai, Russia, Kazakhstan

### Acknowledgements

The authors express their sincere gratitude to S.V. Khromykh, P.D. Kotlyar and O.N. Kuzmina for participation in expedition works and the material provided for the article on Ar-Ar isotopic age of lithium-fluorine granites of the Novo-Akhmirovskoe intrusion; N.G. Karmanova I.V. Nikolaeva (IGM SB RAS, Novosibirsk) for analytical studies to determine the content of rock-forming oxides, rare and rare-earth elements in rare-metal granites of the Novo-Akhmirov Intrusive rod; as well as V.G. Thomas for research on thermometry of melt inclusions.

*The work was carried out on the state task of IGM SB RAS with the financial support of the Ministry of science and higher education of the Russian Federation: project No. 5-1688-2017/PM (definition of petrogenic, rare and rare earth elements in rare-metal granites of Novo-Akhmirovskii rod), project No. 14.Y26.31.0012 (geochemical typing of rare-metal granites of the Novo-Akhmirovskoe rod on the basis of the analysis of distribution in them of rare and rare-earth elements, determination of compositions of rock-forming minerals), the Russian Foundation for basic research: project No. 16-05-00128a (conducting field research on new-Akhmirovka field, the study of the accessory mineral assemblage of the granites Novo-Akhmirovskii rod), project No. 17-05-00936a (<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar isotopic studies of light micas from granites Novo-Akhmirovskoe rod).*

### ВВЕДЕНИЕ

В 80–90-х гг. XX в. в Горном и Рудном Алтае были открыты онгонит-эльвановые дайковые пояса и литиевые интрузивные штоки гипабиссальной фации глубинности [Щерба и др., 1984; Дергачев, 1988; Кудрин и др., 1994; Маслов и др., 1994; Довгаль и др., 1995; Владимиров и др., 1997, 1998]. Предпринятые исследования позволили выделить новую литиеносную провинцию, в которой наряду

с крупными полями сподуменовых пегматитов Калба-Нарым-Коктогайского редкометалльного пояса широко проявлены литиеносные интрузивные штоки и дайковые пояса. Онгонит-эльвановые дайки сейчас рассматриваются в качестве петрологических индикаторов Mo-W, W-Sn и Li-Ta месторождений, однако наибольший интерес вызывают интрузивные штоки литиевых гранитов – Алахинский в Горном Алтае и Ново-Ахмировский (Уланский) в Восточном Казахстане, которые по суще-

ству представляют собой крупные месторождения с бедными рудами, однако имеют контрастный химический и минеральный состав и, как следствие, требуют тщательного изучения. Алахинский интрузивный шток сподуменовых гранит-порфиров сейчас изучен наиболее детально [Анникова и др., 2016]. В настоящей статье представлены новые геологические, геохронологические и минералогическо-геохимические данные по Ново-Ахмировскому штоку.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ново-Ахмировский шток литий-фтористых гранитов приурочен к северо-западному флангу Чечекской метаморфогенной структуры, расположенной в пределах Иртышской сдвиговой зоны (ИСЗ) и непосредственно примыкающей к Калба-Нарымской структурно-формационной зоне (рис. 1). В строении Чечекской структуры участвуют гранитогнейсы, располагающиеся во внутренней части “подковы” Суровского габброидного массива и по существу представляющие собой его мигматизированную кровлю. В настоящее время установлено, что дифференцированные габброиды Суровского массива и мигматит-граниты Чечекской кровли были сформированы в позднем палеозое (315–312 млн лет назад, U/Pb, Ar/Ar изотопное датирование), а затем в составе уже консолидированной метаморфической структуры тектонически экспонированы на верхние уровни земной коры (от 15–20 до 5–7 км). Во внешнем обрамлении Суровского массива с юго-запада на северо-восток (см. рис. 1) залегают углистые алевролиты и песчаники такырской свиты ( $D_3-C_1$ ), которые отделены от габброидов разрывными нарушениями. В северо-западном направлении эти породы сменяются зелеными сланцами ИСЗ [Савинский, Владимиров, 2015; Травин и др., 2016].

Геологическая карта современных выходов литий-фтористых гранитов и геологический разрез, полученный по разведочным скважинам, представлены на рис. 2. Контур выходов гранитов Ново-Ахмировского штока ( $S_{\text{общ}} = 0.02 \text{ км}^2$ ,  $220 \times 110 \text{ м}$ ) ориентирован в северо-восточном направлении, большая часть интрузива перекрыта рыхлыми отложениями. При вскрытии канавами выявлена его грубая зональность: центральная часть сложена среднезернистыми топаз-циннвальдитовыми гранитами с фациальными переходами по краям в порфировидные разности с более тонкозернистым матриксом, для последних характерно обилие пегматоидных и аплитовидных жил, в том числе пересекающих грейзенизированных роговики. По данным геофизических работ и бурения сетки скважин эти граниты без видимого изменения структурно-текстурных особенностей были прослежены до глубины 324–374 м, что позволило интерпретиро-

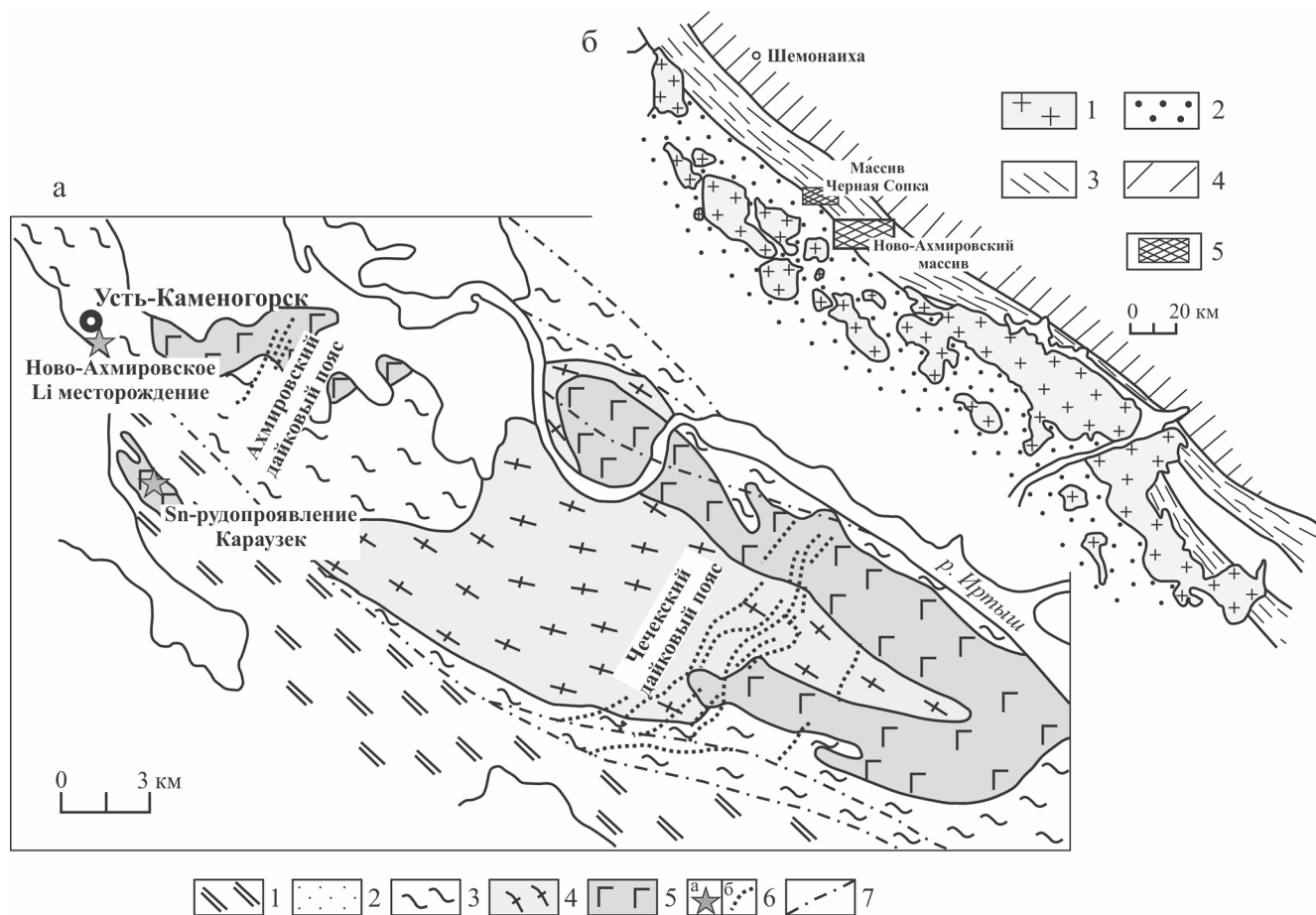
вать глубинную морфологию интрузивного тела как трубообразную апофизу от глубинной магматической камеры [Маслов, 1994; Довгаль и др., 1995]. Кровля магматической камеры была зафиксирована гравиразведкой на глубине  $\approx 1.5 \text{ км}$ , что совпадает с геолого-геофизическими разрезами и расположением кровли отдельных гранитоидных массивов в центральной части Калба-Нарымского батолита [Щерба и др., 1984]. Относительно простое квазиоднородное строение трубообразной апофизы (Ново-Ахмировского штока) было также подтверждено поинтервальным геохимическим опробованием керна разведочных скважин, согласно которому уровень содержания лития и других рудных компонентов устойчиво сохраняется до глубины 374 м (табл. 1). Эти данные свидетельствуют о высокой прогнозной перспективности Ново-Ахмировского литиевого месторождения, сложенного рудами гранитного состава с содержанием  $\text{Li}_2\text{O}$ , варьирующим от 0.2 до 0.4 мас. %, и прогнозными запасами  $\text{Li}_2\text{O}$  110 тыс. т.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Микроскопическое описание шлифов проведено классическим методом на основе коллекции геологических образцов, отобранных нами в ходе полевых исследований на Ново-Ахмировском штоке в 2016 г. Геокартографические материалы, включая результаты опробования разведочных скважин, предоставлены В.И. Масловым (геолого-разведочная компания “Топаз”, г. Усть-Каменогорск).

Определение содержания петрогенных элементов выполнено методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием установки СРМ-25 в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск). Определение концентрации редких и редкоземельных элементов осуществлено методом ICP-MS на масс-спектрометре Element фирмы Finnigan в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН по стандартной методике. Уровни концентрации F, B, Sr, Ba определены методом количественного атомно-эмиссионного анализа, щелочных элементов (K, Na, Li, Rb, Cs) – методом пламенной фотометрии в Аналитическом центре ИГХ СО РАН (г. Иркутск).

Для изучения составов породообразующих минералов из гранитов Ново-Ахмировского штока (плагиоклазов, калиевых полевых шпатов и слюд) отобраны монофракции из образца наиболее “свежего” гранита (№ ВК-16-60), зерна затем смонтированы в “шашку”. Содержание главных компонентов в этих минералах определялось методом рентгеноспектрального микроанализа на электронном анализаторе Camebax Micro Jeol JXA-8100 в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО



**Рис. 1.** Структурно-геологическая схема размещения онгонитов и литий-фтористых гранитов в зоне сочленения Иртышской сдвиговой зоны и центральной части Калба-Нарымской структурно-формационной зоны, Восточный Казахстан (а; составлена В.И. Масловым и М.С. Козловым [Довгаль и др., 1995], с изменениями и дополнениями); и геологическая схема Калба-Нарымского гранитоидного батолита с вынесенным контуром полигона исследований и массива Чёрная Сопка (б).

а: 1 – алевролиты и песчаники с линзами известняков и сланцев живетского яруса; 2 – песчаники, алевролиты, сланцы, известняки эйфельского яруса; 3 – гнейсы, амфиболиты, кристаллические сланцы Иртышской зоны смятия нерасчлененные; 4 – гнейсогранодиориты и гнейсограниты, С<sub>3</sub> Чечекского купола; 5 – дифференцированные габброиды Суровского массива, С<sub>3</sub>; 6а – топазовые циннвальдит-лепидолитовые граниты, Р<sub>2</sub>; 6б – онгонитовые дайки, Р<sub>2</sub>; 7 – дизъюнктивные нарушения.

б: 1 – позднепалеозойские гранитоиды Калба-Нарымского батолита нерасчлененные; 2 – девон-каменноугольные осадочные отложения Калба-Нарымской зоны нерасчлененные; 3 – Иртышская сдвиговая зона; 4 – Рудно-Алтайская структурно-формационная зона; 5 – полигон исследований.

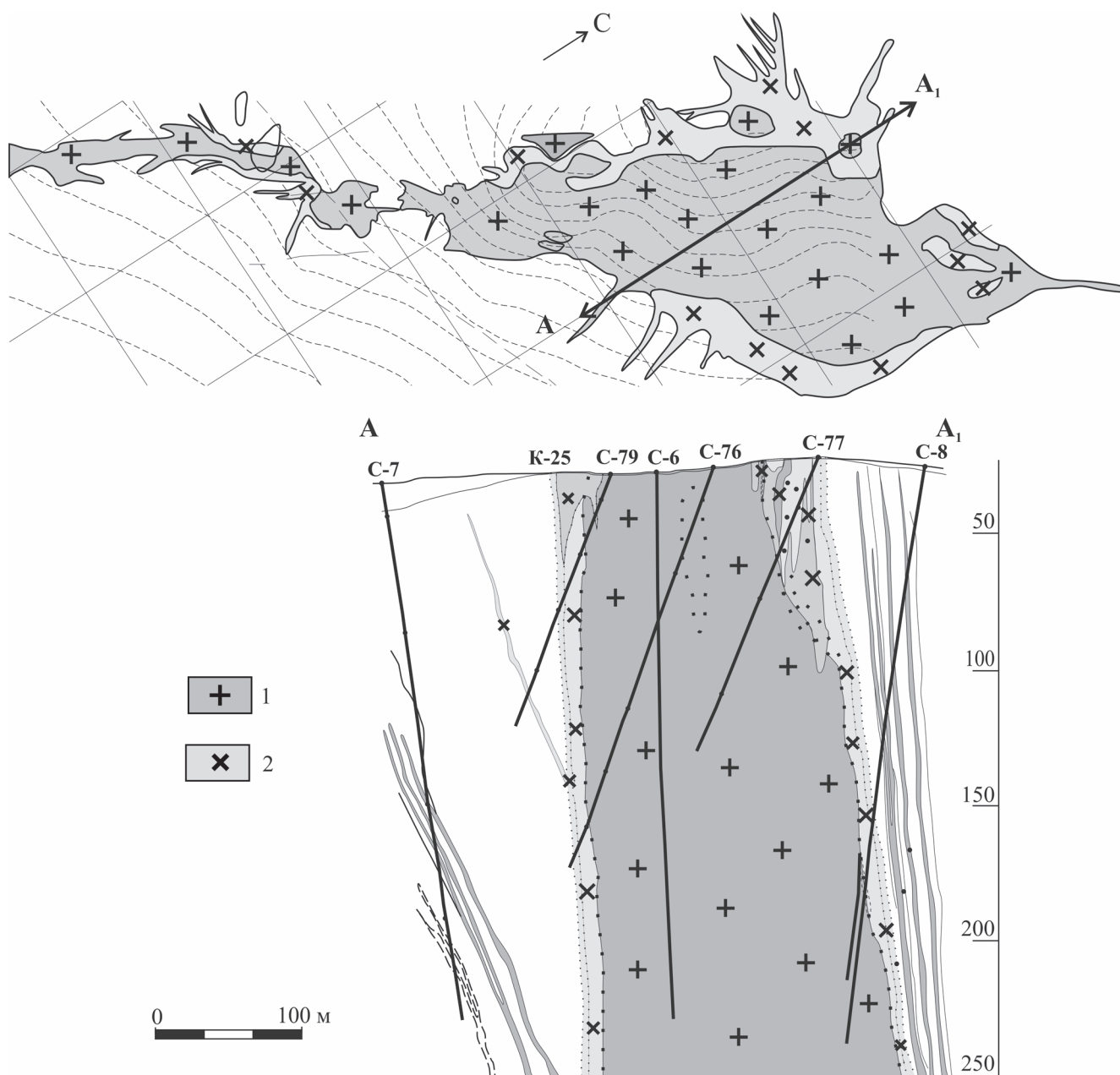
**Fig. 1.** Structural-geological scheme of emplacement of ongonites and lithium-fluorine granites at the joint area of the Irtysh shear zone and the central part of the Kalba-Narym structural-formational zone, East Kazakhstan (a; compiled by V.I. Maslov and M.S. Kozlov [Dovgal et al., 1995], with changes and additions); and geologic scheme of the Kalba-Narym granitoid batholith with studied area outline and with the Black Sopka massif position (b).

a: 1 – the siltstones and sandstones with lenses of limestone and shale of Givetian stage; 2 – sandstones, siltstones, shales, limestone of the Eiffel stage; 3 – gneiss, amphibolites, crystalline schists of the Irtysh shear zone, undivided; 4 – gneiss granodiorites and gneiss granites of Chechek dome, C<sub>3</sub>; 5 – differentiated gabbroids of the Surovsky massif, C<sub>3</sub>; 6a – Topaz zinnwaldite-lepidolite granites, P<sub>2</sub>; 6b – ongonite dikes, P<sub>2</sub>; 7 – disjunctive faults.

b: 1 – Late Paleozoic granitoids of the Kalba-Narym batholith, undifferentiated; 2 – Devon-Carboniferous-sedimentary deposits of the Kalba-Narym zone, undivided; 3 – Irtysh Shear Zone; 4 – The Ore-Altai structural and formational zone; 5 – research area.

РАН. Акцессорный минеральный парагенезис редкометалльных гранитов Ново-Ахмировского штока изучен на сканирующем электронном микроско-

пе Tescan Mira 3 LMU с рентгеноспектральными детекторами EDS и WDS в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.



**Рис. 2.** Геологическая карта и глубинная морфология Ново-Ахмировского интрузивного штока (составлена по данным крупномасштабного картирования и разведочного бурения [Маслов, 1994], с изменениями и дополнениями).

1 – среднезернистые, часто порфировидные топаз-циннвальдитовые граниты главной интрузивной фазы (для структур характерны “горошковидные” выделения кварца и призматические кристаллы калиевого полевого шпата); 2 – мелкозернистые топаз-циннвальдитовые гранит-лейкограниты эндоконтактовой фации (подвержены неравномерной площадной грейзенизации, характерны аплит-пегматиты с резкими или постепенными переходами в граниты).

**Fig. 2.** Geological map and deep morphology of Novo-Akhmirovsky intrusive stock (compiled from large-scale mapping and exploration drilling data [Maslov, 1994], with changes and additions).

1 – medium-grained, often porphyritic topaz-zinnwaldite granites of the main intrusive phase (for structures “pea shaped” of quartz and prismatic crystals of potassic feldspar are characteristic); 2 – fine-grained topaz-zinnwaldite granite-leucogranites of endocontact facies (subjected to uneven areal granite greysening, aplite-pegmatites with sharp or gradual transitions in granite are typical).

**Таблица 1.** Содержание лития, олова и других рудных элементов в гранитах Ново-Ахмировского интрузивного штока по данным разведочного бурения

**Table 1.** Content of lithium, tin and other ore elements in granites of the Novo-Akhmirovsky intrusive stock according to exploration drilling data

| Участок опробования, порода                                                                      | Гипсометрическое положение интервала опробования | Содержание, мас. % |                   |                   |             |                                |                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------|--------------------------------|--------------------------------|
|                                                                                                  |                                                  | Li <sub>2</sub> O  | Rb <sub>2</sub> O | Cs <sub>2</sub> O | Sn          | Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |
| Центральная часть интрузива, мелко-среднезернистые порфировидные граниты с горошковидным кварцем | Поверхность                                      | 0.420              | 0.143             | 0.005             | 0.01–0.1    | 0.003–0.006                    | 0.003–0.011                    |
|                                                                                                  | 0–203 м<br>(инт. 0–203 м, скв. 6)                | 0.461              | 0.160             | 0.005             | 0.056       | 0.004                          | 0.006                          |
|                                                                                                  | 320–366 м<br>(инт. 322–374 м, скв. 37)           | 0.427              | 0.148             | 0.005             | 0.044       | 0.0047                         | 0.008                          |
|                                                                                                  |                                                  |                    |                   |                   |             |                                |                                |
| Эндоконтактовая зона, аплитовидные граниты, участки с пегматитовидными выделениями               | Поверхность                                      | 0.110–0.310        | 0.098–0.170       | 0.004–0.007       | 0.002–0.120 | 0.003                          | 0.007                          |
|                                                                                                  | 125–196 м<br>(инт. 131–202 м, скв. 9)            | 0.057–0.0321       | 0.055–0.141       | 0.005             | 0.006–0.100 | 0.003–0.005                    | 0.007                          |
|                                                                                                  | 133–210 м<br>(инт. 174–214 м, скв. 8)            | 0.082–0.297        | 0.047–0.075       | 0.005             | 0.004–0.005 | 0.005                          | 0.007                          |
|                                                                                                  | 275–320 м<br>(инт. 275.5–322 м, скв. 37)         | 0.093–0.241        | 0.051–0.105       | 0.005             | 0.004–0.045 | 0.003–0.005                    | 0.008                          |
|                                                                                                  |                                                  |                    |                   |                   |             |                                |                                |
|                                                                                                  |                                                  |                    |                   |                   |             |                                |                                |

Примечание. Приведены средневзвешенные содержания либо указаны их вариации при интервальном опробовании разведочных скважин. Прогнозные запасы Ново-Ахмировского литиевого месторождения топаз-циннвальдитовых гранитов: P<sub>Li<sub>2</sub>O</sub> – 110 тыс. т, P<sub>Rb<sub>2</sub>O</sub> – 40, P<sub>Sn</sub> – 13–20, P<sub>Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub></sub> – 1 тыс. т [Маслов, 1994].

Note. The weighted average contents are given, or their variations are indicated for interval testing of exploratory wells. The estimated reserves of the Novo-Akhmirovsky lithium deposit: P<sub>Li<sub>2</sub>O</sub> – 110 thousand tons, P<sub>Rb<sub>2</sub>O</sub> – 40, P<sub>Sn</sub> – 13–20, P<sub>Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub></sub> – 1 thousand tons [Maslov, 1994].

## ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

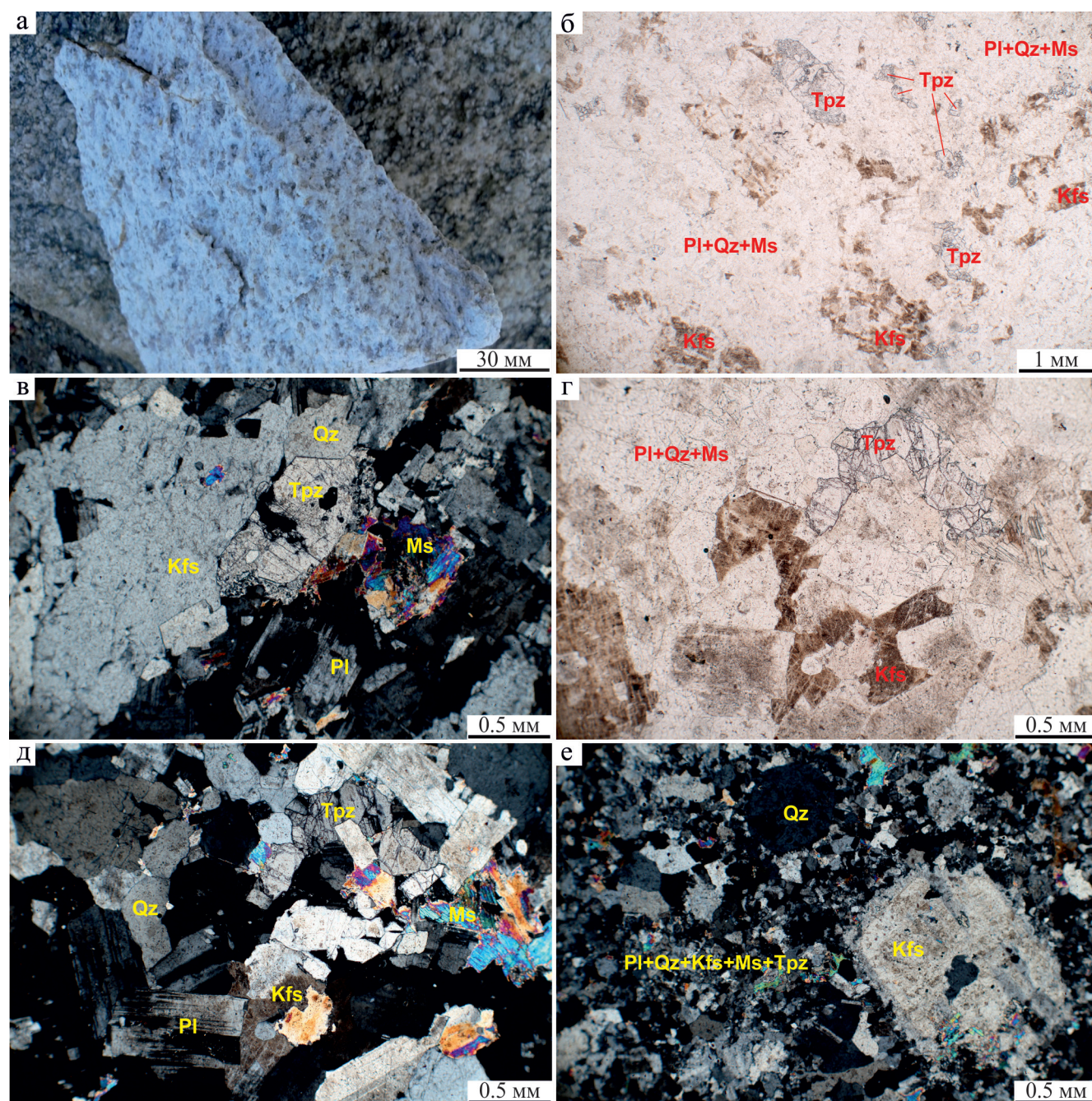
Топаз-циннвальдитовые граниты, слагающие главную интрузивную фазу Ново-Ахмировского штока, – это светло-серые, кремово-серые породы с массивной текстурой и равномернозернистой до слабопорфировидной структурой (рис. 3а), сложенные горошковидным кварцем (30–40%), альбитом (25–40), микроклином (15–35), литиевой слюдой, варьирующей по составу от циннвальдита [Циннвальдит...] до лепидолита (до 10), и топазом (до 5%). Размер зерен породообразующих минералов (полевых шпатов, слюды, топаза) во всех разновидностях гранитов варьирует от 0.5 до 2.5 мм, зерна кварца наиболее крупные, обычно горошковидные, составляют в диаметре 2–4 мм. В порфировидных разновидностях вкрапленники слагают не более 5–10% объема породы и варьируют в размерах от 0.5 до 3.0 мм, размеры кристаллов основной массы обычно не превышают 0.3 мм. Вкрапленники представлены таблитчатыми кристаллами калиевого полевого шпата и округлыми горошковидными зернами кварца. Для пород характерно проявление вторичных изменений в виде пелитизации полевых шпатов. Типичные микроструктуры, отвечающие главной интрузивной фазе гранитов, представлены на микрофотографиях шлифов (рис. 3б–д), эндоконтактовая фация гранитов – на микрофотографии (рис. 3е). Для этой разновидности

сти характерны порфировидные структуры с редкими вкрапленниками полевых шпатов, кварца и более мелкозернистой основной массой. Следует подчеркнуть, что по внешнему облику и текстурно-структурным особенностям литийсодержащие граниты Ново-Ахмировского (Восточный Казахстан) и Алахинского (Горный Алтай) интрузивных штоков подобны друг другу, за исключением вкрапленников топаза, место которого в алахинских гранит-порфирах занимает сподумен [Анникова и др., 2016].

Приведенная далее характеристика минералогеохимических особенностей пород относится к гранитам главной интрузивной фазы Ново-Ахмировского штока.

## РЕДКОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ПОРОД

Геохимическая характеристика гранитов Ново-Ахмировского штока приведена в сравнении со сподуменовыми гранит-порфирами Алахинского штока (табл. 2). На TAS-диаграмме составы топаз-циннвальдитовых гранитов Ново-Ахмировского штока отвечают полю субщелочных гранитов и лейкогранитов (SiO<sub>2</sub> = 70.49–74.38 мас. %, Σ K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O = 8.27–8.97 мас. %, K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O = 0.64–0.87) и пересекаются с полем составов сподуменовых гранит-порфиров Алахинского штока (см. табл. 2, рис. 4а).



**Рис. 3.** Текстурно-структурные особенности литий-фтористых гранитов Ново-Ахмировского интрузивного штока.

а – текстура среднезернистых, часто порфировидных топаз-циннвальдитовых гранитов главной интрузивной фазы; б–д – микроструктуры литий-фтористых гранитов главной интрузивной фазы в параллельных (б, г) и скрещенных (в, д) николях под микроскопом; е – порфировидная структура литий-фтористых гранитов эндоконтактовой фации с вкрапленниками “горошковидного” кварца и таблитчатого калиевого полевого шпата в скрещенных николях.

**Fig. 3.** Textural and structural features of lithium-fluoride granites of the Novo-Akhmirovsky intrusive stock.

а – texture of medium-grained, often porphyritic topaz-zinnwaldite granites of the main intrusive phase; б–д – the microstructure of lithium-fluoride granites of the main intrusive phase in parallel (б, г) and crossed (в, д) nicols under a microscope; е – porphyry structure of lithium-fluoride granites of the endocontact facies with phenocrysts of “pea-shaped” quartz and tabular potassium feldspar in crossed nicols.

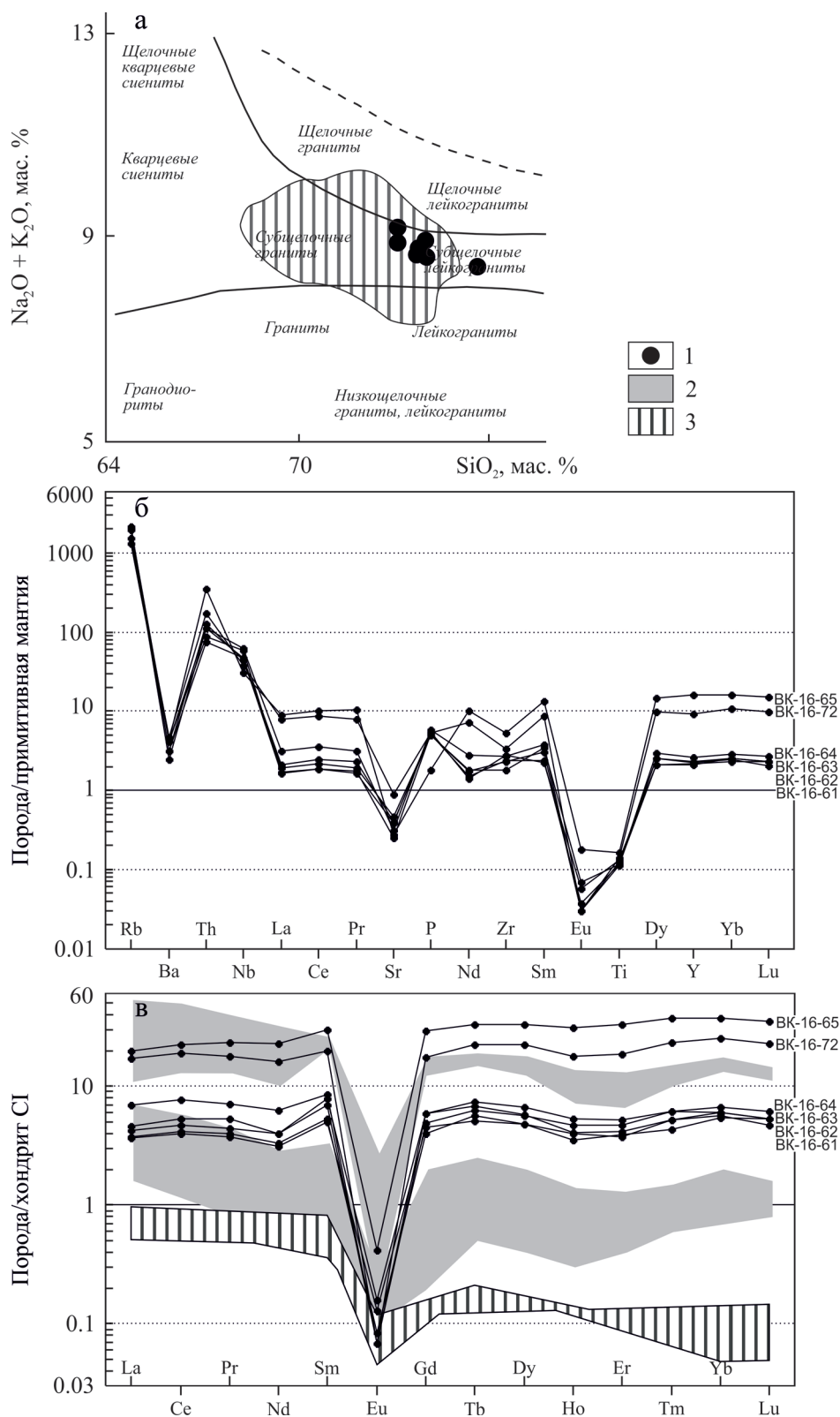
**Таблица 2.** Содержание породообразующих оксидов, фтора, бора, лития (мас. %), редких и редкоземельных (г/т) элементов в представительных образцах гранитов Ново-Ахмировского штока и вмещающих роговиках. Для сравнения приведены составы сподуменовых гранит-порфиров Алахинского штока [Анникова и др., 2016]

**Table 2.** Content of rock-forming oxides, fluorine, boron, lithium (wt %), rare and rare earth (ppm) elements in representative samples from granites of the Novo-Akhmirovsky stock and in the cornea enclosing them. For comparison, the compositions of spodumene granite porphyries of the Alakha stock are given [Annikova et al., 2016]

| Порода                         | Ново-Ахмировский шток         |              |              |              |              |              |              |                                             |                            |                                              |              | Алахинский шток                                                  |        |        |
|--------------------------------|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------|--------------|------------------------------------------------------------------|--------|--------|
|                                | Топаз-циннвальдитовые граниты |              |              |              |              |              |              | Гранит<br>грейзе-<br>низи-<br>рован-<br>ный | Грейзен<br>по гра-<br>ниту | Роговик<br>грейзе-<br>низи-<br>ро-<br>ванный | Рого-<br>вик | Мусковит-<br>сподумен-калишпат-<br>альбитовые гранит-<br>порфиры |        |        |
| № пробы                        | ВК-<br>16-60                  | ВК-<br>16-61 | ВК-<br>16-62 | ВК-<br>16-63 | ВК-<br>16-64 | ВК-<br>16-65 | ВК-16-<br>72 | ВК-16-<br>66                                | ВК-16-<br>67/1             | ВК-<br>16/70                                 | ВК-<br>16/71 | A-1/35                                                           | A-3/36 | 22g-a  |
| SiO <sub>2</sub>               | 71.39                         | 72.02        | 70.49        | 70.97        | 71.54        | 74.38        | 72.25        | 73.79                                       | 74.59                      | 69.11                                        | 64.94        | 73.65                                                            | 71.82  | 72.81  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.03                          | 0.02         | 0.03         | 0.02         | 0.03         | 0.04         | 0.03         | 0.03                                        | 0.04                       | 0.33                                         | 0.67         | <0.03                                                            | <0.03  | <0.03  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15.88                         | 15.43        | 15.68        | 15.60        | 15.52        | 14.00        | 15.50        | 14.95                                       | 14.57                      | 15.80                                        | 16.60        | 17.12                                                            | 17.90  | 19.10  |
| S                              | 0.81                          | 0.72         | 0.82         | 0.55         | 0.86         | 1.02         | 0.91         | 0.73                                        | 1.22                       | 3.56                                         | 4.75         | 0.42                                                             | 0.42   | 0.48   |
| MnO                            | 0.16                          | 0.15         | 0.18         | 0.16         | 0.18         | 0.07         | 0.09         | 0.05                                        | 0.06                       | 0.15                                         | 0.08         | <0.03                                                            | 0.04   | 0.07   |
| MgO                            | 0.03                          | 0.05         | 0.05         | 0.05         | 0.04         | 0.05         | 0.04         | 0.05                                        | 0.07                       | 0.73                                         | 1.44         | <0.01                                                            | <0.01  | 0.38   |
| CaO                            | 0.26                          | 0.23         | 0.57         | 0.50         | 0.31         | 0.56         | 0.34         | 0.45                                        | 0.36                       | 0.57                                         | 1.56         | 0.32                                                             | 0.12   | 0.22   |
| Na <sub>2</sub> O              | 5.33                          | 4.96         | 4.95         | 4.93         | 5.20         | 4.43         | 4.50         | 5.03                                        | 3.64                       | 2.44                                         | 2.69         | 7.27                                                             | 5.19   | 5.14   |
| K <sub>2</sub> O               | 3.64                          | 3.73         | 3.60         | 3.39         | 3.33         | 3.84         | 3.89         | 2.86                                        | 2.93                       | 3.93                                         | 3.63         | 0.43                                                             | 3.31   | 1.07   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.13                          | 0.11         | 0.12         | 0.11         | 0.11         | 0.04         | 0.12         | 0.14                                        | 0.08                       | 0.08                                         | 0.15         | 0.18                                                             | 0.16   | 0.14   |
| F                              | 1.43                          | 1.43         | 1.17         | 1.45         | 1.45         | 1.05         | 1.28         | 0.85                                        | 0.56                       | 1.28                                         | 0.95         | 0.01                                                             | —      | 0.01   |
| B                              | 0.0031                        | 0.0035       | 0.0033       | 0.0037       | 0.0036       | 0.0026       | 0.0042       | 0.005                                       | 0.0055                     | 0.013                                        | 0.011        | 0.002                                                            | 0.0056 | 0.0012 |
| Li                             | 0.22                          | 0.22         | 0.28         | 0.26         | 0.25         | 0.10         | 0.13         | 0.051                                       | 0.036                      | 0.092                                        | 0.039        | 0.37                                                             | 0.51   | 0.58   |
| Rb                             | 1250                          | 1270         | 1380         | 1340         | 1260         | 828          | 973          | 509                                         | 416                        | 633                                          | 397          | 130                                                              | 1900   | 600    |
| Cs                             | 44                            | 46           | 52           | 52           | 55           | 42           | 49           | 48                                          | 20                         | 127                                          | 157          | 73                                                               | 270    | 96     |
| Sr                             | 6.7                           | 5.3          | 8.1          | 9.7          | 8.4          | 5.7          | 19.0         | 3.4                                         | <3.0                       | 23                                           | 188          | 80                                                               | 11     | 14     |
| Ba                             | 29                            | 29           | 22           | 22           | 17           | 30           | 33           | 32                                          | 34                         | 71                                           | 390          | 30                                                               | 30     | —      |
| Be                             | 14                            | 12           | 11           | 10           | 10           | 64           | 18           | 134                                         | 8.9                        | 300                                          | 205          | 100                                                              | 41     | 41     |
| Ta                             | 44                            | 38           | 26           | 25           | 36           | 11.9         | 18.5         | 13.6                                        | 6.7                        | 8.1                                          | 1.21         | 130                                                              | 150    | 100    |
| Nb                             | 62                            | 58           | 43           | 42           | 60           | 28           | 35           | 36                                          | 31                         | 32                                           | 12.9         | 120                                                              | 150    | 232    |
| Zr                             | 25                            | 22           | 23           | 25           | 29           | 81           | 54           | 84                                          | 66                         | 154                                          | 259          | 12                                                               | 8      | 14     |
| Hf                             | 3.1                           | 2.5          | 2.6          | 2.8          | 3.1          | 5.6          | 3.8          | 5.3                                         | 3.9                        | 5.0                                          | 7.0          | 3.1                                                              | 3.6    | 3.7    |
| Y                              | 10.3                          | 9.5          | 9.8          | 10.6         | 12.0         | 73           | 42           | 67                                          | 64                         | 34                                           | 31           | 2.0                                                              | 51     | 15     |
| La                             | 2.2                           | 1.17         | 1.13         | 1.31         | 1.43         | 6.2          | 5.4          | 7.8                                         | 12.6                       | 25                                           | 38           | 0.3                                                              | 0.16   | 0.24   |
| Ce                             | 6.2                           | 3.3          | 3.3          | 3.8          | 4.3          | 18.1         | 15.5         | 24                                          | 38                         | 58                                           | 77           | —                                                                | —      | —      |
| Pr                             | 0.86                          | 0.48         | 0.46         | 0.54         | 0.64         | 2.9          | 2.2          | 3.5                                         | 5.4                        | 7.2                                          | 9.1          | —                                                                | —      | —      |
| Nd                             | 3.7                           | 2.0          | 1.88         | 2.4          | 2.4          | 13.7         | 9.7          | 14.0                                        | 22                         | 29                                           | 35           | —                                                                | —      | —      |
| Sm                             | 1.67                          | 1.05         | 0.98         | 1.34         | 1.55         | 5.9          | 3.9          | 6.4                                         | 8.9                        | 7.1                                          | 6.4          | 0.16                                                             | 0.09   | 0.07   |
| Eu                             | 0.005                         | 0.006        | 0.009        | 0.005        | 0.012        | 0.030        | 0.005        | 0.005                                       | 0.008                      | 0.20                                         | 1.20         | 0.0088                                                           | 0.0033 | 0.0086 |
| Gd                             | 1.53                          | 1.04         | 1.17         | 1.27         | 1.52         | 7.5          | 4.6          | 7.2                                         | 8.4                        | 5.9                                          | 6.1          | —                                                                | —      | —      |
| Tb                             | 0.32                          | 0.27         | 0.24         | 0.30         | 0.35         | 1.56         | 1.07         | 1.77                                        | 1.77                       | 1.05                                         | 0.89         | 0.01                                                             | 0.01   | —      |
| Dy                             | 1.85                          | 1.53         | 1.56         | 1.84         | 2.2          | 10.7         | 7.2          | 11.3                                        | 10.6                       | 6.2                                          | 5.4          | —                                                                | —      | —      |
| Ho                             | 0.29                          | 0.28         | 0.25         | 0.34         | 0.38         | 2.2          | 1.27         | 2.1                                         | 1.84                       | 1.08                                         | 1.08         | —                                                                | —      | —      |
| Er                             | 0.88                          | 0.80         | 0.82         | 0.99         | 1.10         | 7.0          | 3.9          | 6.1                                         | 5.6                        | 3.2                                          | 3.0          | —                                                                | —      | —      |
| Tm                             | 0.17                          | 0.17         | 0.14         | 0.20         | 0.20         | 1.22         | 0.76         | 1.16                                        | 1.05                       | 0.54                                         | 0.51         | —                                                                | —      | —      |
| Yb                             | 1.19                          | 1.25         | 1.13         | 1.25         | 1.40         | 7.8          | 5.3          | 8.5                                         | 7.3                        | 3.9                                          | 3.1          | 0.016                                                            | 0.01   | 0.03   |
| Lu                             | 0.15                          | 0.17         | 0.17         | 0.17         | 0.20         | 1.13         | 0.74         | 1.16                                        | 1.02                       | 0.54                                         | 0.45         | 0.0025                                                           | 0.0016 | 0.0047 |
| ΣРЗЭ                           | 21.03                         | 13.57        | 13.20        | 15.75        | 17.64        | 85.99        | 61.41        | 94.78                                       | 124.63                     | 148.83                                       | 187.75       | 0.50                                                             | 0.27   | 0.35   |

Примечание. Анализы выполнены в аналитических лабораториях ИГМ и ИГХ СО РАН; “<” – содержание элемента ниже чувствительности аналитического метода, ΣРЗЭ – сумма редкоземельных элементов, прочерк – не определялось.

Note. Analyzes were performed in analytical laboratories of the IGM and IGC SB RAS; “<” – the content of the element is lower the sensitivity of the analytical method, ΣREE – the amount of rare earth elements, dash – not defined.



**Рис. 4.** Геохимические диаграммы топаз-цинновальдитовых гранитов Ново-Ахмировского интрузивного штока (составлена по данным табл. 4 и данным из [Анникова и др., 2016]).

а – TAS-диаграмма [Магматические..., 1983]; б – мультиэлементные спектры, нормированные по составу примитивной мантии [Sun, McDonough, 1989]; в – спектры редкоземельных элементов, нормированные по хондриту CI [Boynnton, 1984]. 1 – литий-фтористые граниты Ново-Ахмировского штока, 2 – онгониты Чечекского и Ахмировского дайковых поясов, 3 – сподуменовые гранит-порфиры Алахинского штока.

**Fig. 4.** Geochemical diagrams of topaz-zinnwaldite granites of the Novo-Akhmirovsky intrusive stock (compiled according to Table 4 and data [Annikova et al., 2016]).

a – TAS-diagram [Magmatic..., 1983]; б – multi-element charts normalized by the composition of the primitive mantle [Sun, McDonough, 1989]; в – charts of rare-earth elements, normalized by chondrite CI [Boynton, 1984].  
 1 – lithium-fluoric granites of the Novo-Akhmirovsky stock, 2 – ongonites of the Chechek and Akhmirov dyke belts, 3 – spodumene granite porphyries of the Alakha stock.

Для гранитов Ново-Ахмировского штока отмечаются следующие вариации уровней концентрации литофильных редких элементов, фтора и бора (по 7 пробам, в г/т): Li (1000–2800), Rb (830–1380), Cs (42–55), Nb (28–62), Ta (12–44), Ga (26–47), Sn (170–1200), В (17–220), F – 0.75–1.85 мас. %, в то же время для них характерны пониженное содержание Sr (5.7–19.0), Ba (5–14) и низкие  $\Sigma$  РЗЭ (86–14) (все в г/т, см. табл. 2).

На спайдер-диаграммах для гранитов Ново-Ахмировского штока отмечаются максимумы по Cs, Rb, Nb и минимумы – по Sr, Ba, Zr, Ti (см. рис. 4б). Спектры распределения РЗЭ симметричны с небольшим обогащением тяжелыми элементами:  $(La/Yb)_n = 0.53–0.71$ , в одном случае установлено слабое обеднение тяжелыми РЗЭ:  $(La/Yb)_n = 1.22$  (см. рис. 4в). Для всех спектров характерно наличие глубоких европиевых минимумов:  $(Eu/Eu^*)_n = 0.01–0.03$ . По геохимическим особенностям граниты Ново-Ахмировского штока обнаруживают значительное сходство со средними составами литий-фтористой фации плюмазитовых редкометалльных лейкогранитов [Таусон, 1977]. В сравнении со сподуменовыми гранит-порфирами Алахинского штока они отличаются более высоким содержанием РЗЭ: 3–30 хондритовых единиц и 0.05–0.10 хондритовых единиц соответственно и более глубокими Eu-минимумами:  $(Sm/Eu)_n = 38.8–283.6$  и  $(Sm/Eu)_n =$

$= 3.0–11.5$  соответственно. Кроме того, породам Алахинского штока свойственны более фракционированные спектры РЗЭ с заметным обогащением легкими лантаноидами:  $(La/Yb)_n = 5.39–12.64$  (см. рис. 4в). Следует отметить, что по геохимическим особенностям самыми близкими аналогами гранитов Ново-Ахмировского штока являются литий-фтористые топаз-циннвальдитовые (протолитовые) граниты и аплиты Этыкинского редкометалльного рудного поля в Восточном Забайкалье, которые также рассматривались как перспективное литиевое месторождение с крупными запасами, но бедными рудами гранитного состава [Бескин и др., 1994].

## ПОРОДООБРАЗУЮЩИЕ МИНЕРАЛЫ

**Плагноклазы** из гранитов Ново-Ахмировского штока отвечают альбитам от практически “чистых” (100% альбитового минала) до альбитов с примесью до 6% анортитовой составляющей, содержание ортоклазового минала в проанализированных плагноклазах не превышает 2% (табл. 3).

**Калиевые полевые шпаты** представлены ортоклазом (вариации ортоклазового минала составляют от 94 до 99%), для их составов характерны весьма незначительные (0.01–0.12 мас. %), а иногда ниже предела чувствительности аналитического метода значения содержания CaO (табл. 4). Составы

**Таблица 3.** Составы плагноклазов из литий-фтористых гранитов Ново-Ахмировского штока, мас. %

**Table 3.** Compositions of plagioclase from lithium-fluoride granites of the Novo-Akhmirovsky stock, wt %

| Компонент                                                                                                            | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| SiO <sub>2</sub>                                                                                                     | 68.21 | 67.29 | 67.86 | 67.13 | 66.49 | 67.56 | 67.7  | 67.13 | 67.27 | 66.26 | 67.4  | 67.97 | 66.79 | 67.92 | 65.83 | 68.00  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                                                       | 19.17 | 19.78 | 19.55 | 19.59 | 20.42 | 19.87 | 19.52 | 19.93 | 19.01 | 20.03 | 19.76 | 19.45 | 19.83 | 19.68 | 20.58 | 19.49  |
| Na <sub>2</sub> O                                                                                                    | 11.68 | 11.72 | 12    | 11.75 | 11.16 | 11.93 | 12.04 | 11.71 | 12.01 | 11.29 | 11.54 | 11.92 | 11.54 | 11.97 | 11.28 | 12.15  |
| K <sub>2</sub> O                                                                                                     | 0.02  | 0.12  | 0.14  | 0.17  | 0.31  | 0.16  | 0.17  | 0.19  | 0.08  | 0.37  | 0.14  | 0.14  | 0.19  | 0.12  | 0.17  | 0.1    |
| CaO                                                                                                                  | 0.01  | 0.35  | 0.18  | 0.46  | 0.98  | 0.36  | 0.05  | 0.44  | 0.05  | 1.31  | 0.33  | 0.05  | 0.84  | 0.26  | 1.32  | 0.32   |
| Сумма                                                                                                                | 99.09 | 99.26 | 99.73 | 99.11 | 99.36 | 99.88 | 99.48 | 99.4  | 99.42 | 99.26 | 99.17 | 99.53 | 99.19 | 99.85 | 99.18 | 100.06 |
| Кристаллохимические коэффициенты, рассчитанные на 8 атомов кислорода<br>(количество ионов в пересчете на 8 атомов О) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
| Si                                                                                                                   | 3.00  | 2.97  | 2.98  | 2.97  | 2.94  | 2.96  | 2.98  | 2.96  | 2.99  | 2.94  | 2.97  | 2.99  | 2.95  | 2.98  | 2.92  | 2.98   |
| Al                                                                                                                   | 0.99  | 1.03  | 1.01  | 1.02  | 1.06  | 1.03  | 1.01  | 1.04  | 1.00  | 1.05  | 1.03  | 1.01  | 1.03  | 1.02  | 1.08  | 1.01   |
| Na                                                                                                                   | 1.00  | 1.00  | 1.02  | 1.01  | 0.96  | 1.02  | 1.03  | 1.00  | 1.04  | 0.97  | 0.99  | 1.02  | 0.99  | 1.02  | 0.97  | 1.03   |
| K                                                                                                                    | 0.00  | 0.01  | 0.01  | 0.01  | 0.02  | 0.01  | 0.01  | 0.01  | 0.00  | 0.02  | 0.01  | 0.01  | 0.01  | 0.01  | 0.01  | 0.01   |
| Ca                                                                                                                   | 0.00  | 0.02  | 0.01  | 0.02  | 0.05  | 0.02  | 0.00  | 0.02  | 0.00  | 0.06  | 0.02  | 0.00  | 0.04  | 0.01  | 0.06  | 0.02   |
| Молекулярные проценты основных миналов                                                                               |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
| Ab                                                                                                                   | 100.0 | 98.0  | 98.0  | 97.0  | 94.0  | 98.0  | 99.0  | 97.0  | 99.0  | 92.0  | 98.0  | 99.0  | 95.0  | 98.0  | 93.0  | 98.0   |
| An                                                                                                                   | 0.0   | 1.0   | 1.0   | 2.0   | 4.0   | 2.0   | 0.0   | 2.0   | 0.0   | 6.0   | 1.0   | 0.0   | 4.0   | 1.0   | 6.0   | 1.0    |
| Or                                                                                                                   | 0.0   | 1.0   | 1.0   | 1.0   | 2.0   | 1.0   | 1.0   | 1.0   | 1.0   | 2.0   | 1.0   | 1.0   | 1.0   | 1.0   | 1.0   | 1.0    |

**Таблица 4.** Составы калиевых полевых шпатов из литий-фтористых гранитов Ново-Ахмировского штока, мас. %**Table 4.** Compositions of potassium feldspar from lithium-fluoride granites of the Novo-Akhmirovsky stock, wt %

| Компонент                                                                                                            | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub>                                                                                                     | 64.73 | 64.78 | 64.79 | 64.30 | 64.19 | 64.88 | 64.77 | 64.14 | 65.73 | 65.52 | 64.42 | 64.51 | 64.04 | 65.00 | 64.17 | 64.88 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                                                       | 18.26 | 18.43 | 18.37 | 17.89 | 18.06 | 18.04 | 17.75 | 18.28 | 17.98 | 17.85 | 17.99 | 17.87 | 17.95 | 17.96 | 18.18 | 18.06 |
| Na <sub>2</sub> O                                                                                                    | 0.19  | 0.65  | 0.50  | 0.41  | 0.16  | 0.19  | 0.52  | 0.11  | 0.22  | 0.14  | 0.17  | 0.25  | 0.23  | 0.16  | 0.22  | 0.64  |
| K <sub>2</sub> O                                                                                                     | 15.25 | 14.73 | 14.87 | 15.70 | 15.90 | 15.76 | 15.46 | 15.96 | 15.02 | 15.42 | 15.59 | 15.46 | 16.46 | 15.77 | 15.86 | 14.57 |
| CaO                                                                                                                  | —     | —     | 0.01  | 0.01  | —     | —     | 0.12  | —     | 0.01  | 0.02  | 0.01  | 0.02  | 0.02  | —     | —     | —     |
| Сумма                                                                                                                | 98.43 | 98.59 | 98.54 | 99.40 | 98.31 | 98.87 | 98.62 | 98.49 | 98.96 | 98.95 | 98.18 | 98.11 | 98.70 | 98.89 | 98.43 | 98.15 |
| Кристаллохимические коэффициенты, рассчитанные на 8 атомов кислорода<br>(количество ионов в пересчете на 8 атомов О) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Si                                                                                                                   | 3.02  | 3.01  | 3.01  | 3.01  | 3.01  | 3.02  | 3.02  | 3.00  | 3.04  | 3.04  | 3.02  | 3.02  | 3.00  | 3.02  | 3.01  | 3.02  |
| Al                                                                                                                   | 1.00  | 1.01  | 1.01  | 0.99  | 1.00  | 0.99  | 0.98  | 1.01  | 0.98  | 0.98  | 0.99  | 0.99  | 0.99  | 0.98  | 1.00  | 0.99  |
| Na                                                                                                                   | 0.02  | 0.06  | 0.05  | 0.04  | 0.01  | 0.02  | 0.05  | 0.01  | 0.02  | 0.01  | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.01  | 0.02  | 0.06  |
| K                                                                                                                    | 0.91  | 0.87  | 0.88  | 0.94  | 0.95  | 0.94  | 0.92  | 0.98  | 0.89  | 0.91  | 0.93  | 0.92  | 0.98  | 0.94  | 0.95  | 0.87  |
| Ca                                                                                                                   | 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  | 0.00  |
| Молекулярные проценты основных миналов                                                                               |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Ab                                                                                                                   | 2.0   | 6.0   | 5.0   | 4.0   | 3.0   | 3.0   | 5.0   | 1.0   | 2.0   | 3.0   | 2.0   | 2.0   | 2.0   | 1.0   | 1.0   | 6.0   |
| An                                                                                                                   | 0.0   | 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   |
| Or                                                                                                                   | 98.0  | 94.0  | 95.0  | 96.0  | 96.0  | 97.0  | 95.0  | 99.0  | 98.0  | 97.0  | 98.0  | 98.0  | 98.0  | 99.0  | 99.0  | 94.0  |

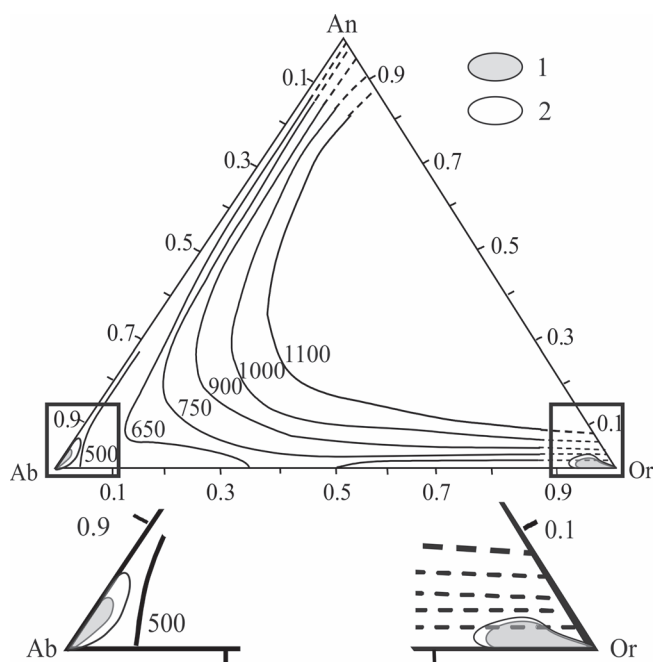
Примечание. Прочерк – содержание компонента ниже предела чувствительности аналитического метода.

Note. Dash – below limit of detection.

плаггиоклазов из гранитов Ново-Ахмировского штока, вынесенные на треугольную диаграмму “альбит–анортит–ортоклаз”, формируют более широкое поле в сравнении с составами плаггиоклазов из сподуменовых гранит-порфиров Алахинского штока, в то время как поля составов калиевых полевых шпатов из гранитов Ново-Ахмировского и Алахинского штоков практически совпадают (рис. 5).

**Литиевые слюды** из гранитов Ново-Ахмировского штока в протоочках повсеместно пред-

ставлены серебристо-белыми до серебристо-серых с перламутровым отливом идиоморфными лейстами. Существенный недостаток суммы компонентов в их составах, а также высокое (до 10 мас. %) содержание F (табл. 5) связаны с тем, что уровень концентрации таких компонентов, как Li<sub>2</sub>O и H<sub>2</sub>O, не определяется на микроанализаторе Jeol JXA-8100. По данным предыдущих исследователей [Маслов и др., 1994], для слюд из гранитов Ново-Ахмировского штока характерно содер-



**Рис. 5.** Составы калиевых полевых шпатов и плаггиоклазов из литий-фтористых гранитов Ново-Ахмировского штока в миналах “ортоклаз–анортит–альбит”.

Линии солидуса проведены для  $P_{(H_2O)} = 1.5$  кбар,  $T$  от 500 до 1100°C [Barth, 1961; Seck, 1972]. Поля составов полевых шпатов: 1 – составы полевых шпатов из мусковит-сподумен-альбитовых гранит-порфиров Алахинского штока [Анникова и др., 2016], 2 – составы полевых шпатов из гранитов Ново-Ахмировского штока.

**Fig. 5.** Compositions of potassium feldspars and plagioclases from lithium-fluoride granites of the Novo-Akhmirovsky stock in the orthoclase–anorthite–albite minals.

Solidus lines are drawn for  $P_{(H_2O)} = 1.5$  kbar,  $T$  from 500 to 1100°C [Barth, 1961; Seck, 1972]. Fields of feldspar compositions: 1 – compositions of feldspars from muscovite-spodumen-albite granite-porphyrries of the Alakhinsky stock [Annikova et al., 2016], 2 – compositions of feldspars from granites of the Novo-Akhmirovsky stock.

**Таблица 5.** Составы слюд из литий-фтористых гранитов Ново-Ахмировского штока, мас. %

**Table 5.** Compositions of mica from lithium-fluoride granites of the Novo-Akhmirovsky stock, wt %

| Компонент                                                  | 1     | 2     | 3     | 4      | 5     | 6     | 7      | 8     | 9     | 10    |
|------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub>                                           | 49.88 | 51.20 | 49.34 | 53.80  | 43.95 | 52.46 | 48.66  | 48.58 | 49.66 | 47.36 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                             | 20.01 | 18.11 | 18.18 | 24.24  | 25.40 | 17.63 | 20.04  | 22.58 | 19.46 | 20.46 |
| K <sub>2</sub> O                                           | 8.67  | 8.67  | 8.64  | 8.23   | 8.26  | 8.76  | 9.64   | 7.43  | 9.31  | 8.94  |
| Na <sub>2</sub> O                                          | 0.19  | 0.14  | 0.11  | 0.2    | 0.30  | 0.11  | 0.13   | 0.22  | 0.24  | 0.24  |
| FeO                                                        | 5.17  | 3.96  | 4.04  | 1.12   | 6.07  | 4.04  | 6.10   | 5.23  | 5.06  | 5.35  |
| MnO                                                        | 1.83  | 1.44  | 1.44  | 0.48   | 2.32  | 1.29  | 2.01   | 1.74  | 1.89  | 1.96  |
| MgO                                                        | 0.03  | 0.03  | 0.06  | 0.01   | 0.06  | 0.05  | 0.05   | 0.06  | 0.042 | 0.04  |
| CaO                                                        | 0.016 | 0.004 | 0.026 | —      | 0.002 | —     | 0.013  | 0.016 | 0.02  | 0.08  |
| Rb <sub>2</sub> O                                          | 0.96  | 1.09  | 0.85  | 1.02   | 0.37  | 0.91  | 1.04   | 0.79  | 1.15  | 0.90  |
| Cs <sub>2</sub> O                                          | 0.028 | 0.032 | 0.036 | 0.018  | 0.002 | 0.04  | 0.06   | 0.02  | 0.031 | 0.029 |
| Li <sub>2</sub> O*                                         | 6.00  | 6.56  | 6.59  | 8.24   | 4.37  | 6.65  | 6.73   | 4.06  | 6.14  | 6.51  |
| F                                                          | 8.55  | 9.03  | 9.05  | 10.37  | 7.05  | 9.10  | 9.17   | 6.74  | 8.67  | 8.98  |
| Cl                                                         | 0.016 | —     | —     | —      | 0.001 | —     | —      | —     | —     | —     |
| Сумма                                                      | 98.03 | 96.77 | 94.86 | 100.72 | 95.43 | 97.52 | 100.09 | 94.87 | 98.32 | 97.33 |
| Кристаллохимические коэффициенты, рассчитанные по катионам |       |       |       |        |       |       |        |       |       |       |
| Si                                                         | 3.45  | 3.54  | 3.47  | 3.35   | 3.20  | 3.60  | 3.26   | 3.60  | 3.42  | 3.25  |
| Al (IV)                                                    | 0.55  | 0.46  | 0.53  | 0.65   | 0.80  | 0.40  | 0.74   | 0.40  | 0.58  | 0.75  |
| Al (VI)                                                    | 1.08  | 1.02  | 0.98  | 1.13   | 1.38  | 1.03  | 0.84   | 1.57  | 0.99  | 0.91  |
| Fe                                                         | 0.30  | 0.23  | 0.24  | 0.06   | 0.37  | 0.23  | 0.34   | 0.32  | 0.29  | 0.31  |
| Mn                                                         | 0.11  | 0.08  | 0.09  | 0.03   | 0.14  | 0.08  | 0.11   | 0.11  | 0.11  | 0.11  |
| Mg                                                         | 0.003 | 0.003 | 0.006 | 0.001  | 0.007 | 0.005 | 0.005  | 0.007 | 0.004 | 0.004 |
| Ca                                                         | 0.001 | 0.000 | 0.002 | 0.000  | 0.000 | 0.000 | 0.001  | 0.001 | 0.001 | 0.006 |
| K                                                          | 0.77  | 0.77  | 0.77  | 0.65   | 0.77  | 0.77  | 0.82   | 0.70  | 0.82  | 0.78  |
| Na                                                         | 0.025 | 0.019 | 0.015 | 0.024  | 0.042 | 0.015 | 0.017  | 0.032 | 0.032 | 0.032 |
| Rb                                                         | 0.043 | 0.049 | 0.038 | 0.041  | 0.017 | 0.040 | 0.045  | 0.038 | 0.051 | 0.040 |
| Cs                                                         | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.000  | 0.000 | 0.001 | 0.002  | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| Li                                                         | 1.67  | 1.83  | 1.86  | 2.06   | 1.28  | 1.84  | 1.81   | 1.21  | 1.70  | 1.80  |
| F                                                          | 1.87  | 1.98  | 2.01  | 2.04   | 1.62  | 1.98  | 1.94   | 1.58  | 1.89  | 1.95  |
| Cl                                                         | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.000  | 0.000 | 0.000 | 0.000  | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

\*Содержание Li<sub>2</sub>O было рассчитано, исходя из концентраций фтора по формуле  $Li_2O^* = 0.177 \times F^{1.642}$  [Tieschendorf et al., 1997].  
 Примечание. Прочерк – содержание компонента ниже предела чувствительности аналитического метода.

\*The content of Li<sub>2</sub>O was calculated based on the concentrations of fluorine using the formula  $Li_2O^* = 0.177 \times F^{1.642}$  [Tieschendorf et al., 1997].

Note. Dash – below limit of detection.

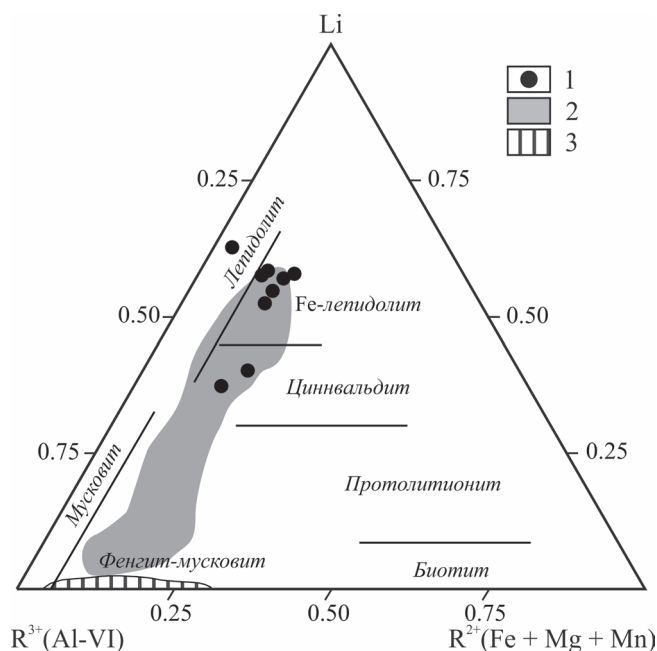
жание Li<sub>2</sub>O – 2.60–4.44, F – 3.04–4.39, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – до 0.006, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – до 0.025, Sn – до 0.043, H<sub>2</sub>O – до 0.04 (мас. %).

Широкие вариации в содержании главных компонентов: (K<sub>2</sub>O – 9.64–7.43, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 17–25, SiO<sub>2</sub> – 44–54 (см. табл. 5)), а также высокое содержание Li<sub>2</sub>O (до 4.4), F (до 10.4) и повышенное – FeO (до 6.1) (все в мас. %) в составе светлых слюд из гранитов Ново-Ахмировского штока позволяют отнести их к подгруппе лепидолита, при этом состав варьирует между двумя минеральными видами: собственно лепидолитом и циннвальдитом. Обращает на себя внимание тот факт, что их состав совпадает с первично-магматическими слюдами из онгитовых даек Восточного Казахстана [Соколова и др., 2016] и резко отличается от сподуменовых гранит-порфиров Алахинского штока, для которых характерно ничтожное содержание  $Li_2O \leq 0.14$ –0.34 мас. %, находящееся на уровне аналитических погрешностей (рис. 6).

## АКЦЕССОРНЫЕ МИНЕРАЛЫ

Характеристика акцессорного минерального парагенезиса гранитов Ново-Ахмировского штока представлена в сравнении с таковыми Алахинского штока. В топаз-циннвальдитовых гранитах Ново-Ахмировского интрузивного штока диагностированы следующие акцессорные минеральные фазы (в порядке уменьшения их распространенности): прозрачный топаз, голубоватый апатит, розовый полупрозрачный гранат, касситерит, танталит-колумбит, пирит, арсенопирит, сфалерит, галенит, халькопирит, циркон, полупрозрачный зеленовато-бурый турмалин, ильменит, рутил, сфен, магнетит, фосфаты РЗЭ (ксенотим, брокит). Составы наиболее распространенных из них – топазов, апатитов и гранатов – приведены в табл. 6–8.

**Топаз** является наиболее распространенным акцессорным минералом гранитов Ново-Ахмировского штока (до 5% в составе породы). В протооч-



**Рис. 6.** Состав слюд из гранитов Ново-Ахмировского штока на треугольной диаграмме  $R^{2+}(\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Mn})\text{--Li--}R^{3+}(\text{Al}^{\text{VI}})$ . Элементы — в формульных единицах.

1 — Ново-Ахмировский шток, 2 — редкометалльные и ультраредкометалльные онгониты Чечекского пояса [Соколова и др., 2016], 3 — мусковит-сподумен-альбитовые гранит-порфиры Алахинского штока (Горный Алтай) [Анникова и др., 2016].

**Fig. 6.** Composition of mica from granites of the Novo-Akhmirovsky stock on the triangular diagram  $R^{2+}(\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Mn})\text{--Li--}R^{3+}(\text{Al}^{\text{VI}})$ . Elements are given in the formula amounts.

1 — Novo-Akhmirovsky stock, 2 — rare-metal and ultra rare-metal ongonites of the Chechek dike belt [Sokolova et al., 2016], 3 — muscovite-spodumene-albite granite-porphyry of the Alakha stock (Gorny Altai) [Annikova et al., 2016].

ках он повсеместно представлен бесцветными прозрачными до полупрозрачных короткостолбчатыми кристаллами и параллельно-шестоватыми агрегатами со стекляннм до перламутрового блеском на плоскостях спайности. Для топаза характерны микровключения как породообразующих минералов (слюды и плагиоклаза), так и других акцессорных минеральных фаз, в частности апатита, танталит-колумбита и циркона (рис. 7). Главными компонентами в составе топазов Ново-Ахмировского штока являются  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  и F, какие-либо примеси выявлены не были (см. табл. 6).

**Апатит** представлен полупрозрачными голубоватыми короткопризматическими до длиннопризматическими кристаллами со стекляннм до жирного блеском. Иногда отмечаются достаточно отчетливые гексагональные сечения зерен апатита (см. рис. 7). Апатит чаще всего находится в сростании

с породообразующими минералами (альбитом, калишпатом и слюдой), реже — с другими акцессорными минералами (топазом, цирконом, касситеритом), отмечены его микровключения в топазе. По химическому составу апатит из гранитов Ново-Ахмировского штока оказался Mn-содержащим F-апатитом (см. табл. 7), как и апатит из сподуменных гранит-порфиров Алахинского штока [Анникова и др., 2016].

**Гранат** представлен розовыми до буровато-розовых полупрозрачными округлыми зернами со стекляннм до жирного блеском. В них диагностированы микровключения кварца и фосфатов РЗЭ (см. рис. 7). Главными компонентами в составах гранатов из гранитов Ново-Ахмировского штока являются  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , FeO и MnO, второстепенными — CaO и MgO, что позволяет отнести их к типичным для гранитных пород альмандин-спессартинам, но с небольшой примесью андрадитового минала, и лишь два состава (1 и 7, см. табл. 8) отвечают спессартин-альмандину, содержащему не андрадитовый, а гроссуляровый минал, что также характерно для гранитов.

**Касситерит** образует отдельные короткопризматические зерна и их сростки от коричневого, буровато-коричневого до смоляно-черного цвета с алмазным на плоскостях кристаллов до жирного и смоляного на изломе блеска. Находясь в сростании с апатитом, касситерит содержит микровключения циркона (см. рис. 7). Для его состава характерными оказались примеси, мас. %: FeO — 0.99,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  — 3.14,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  — 2.59.

**Минералы рода танталита-колумбита** представлены идиоморфными кристаллами таблитчатого габитуса от темно-бурого до смоляно-черного цвета с металлическим блеском и диагностированы только в виде микровключений в топазе (см. рис. 7). Состав минералов рода танталита-колумбита, присутствующих в гранитах Ново-Ахмировского штока, позволяет отнести их к манганколумбитам, мас. %:  $\text{TiO}_2$  — 1.53, FeO — 8.21, MnO — 12.22,  $\text{WO}_3$  — 10.44,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  — 63.32,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  — 6.96. В сподуменных гранит-порфирах Алахинского штока также определены манганколумбиты, но с более низким содержанием  $\text{TiO}_2$  (в среднем 0.55) и  $\text{WO}_3$  (в среднем 0.69 мас. %) [Анникова и др., 2016].

**Циркон** в гранитах Ново-Ахмировского штока, в отличие от гранит-порфиров Алахинского, является значительно менее распространенным. Он диагностирован в виде единичных идиоморфных микровключений в касситерите и топазе (см. рис. 7). В составе цирконов Ново-Ахмировского штока, как и в сподуменных гранит-порфирах Алахинского, обнаружены существенные примеси  $\text{HfO}_2$  (4.93) и  $\text{UO}_2$  (2.95 мас. %).

**Фосфаты РЗЭ** в виде агрегатов ксеноморфных зерен встречаются как микровключения в гранате (см. рис. 7). По вариациям главных компонентов

**Таблица 6.** Состав топазов из литий-фтористых гранитов Ново-Ахмировского штока, мас. %

**Table 6.** Compositions of topaz from lithium-fluoride granites of the Novo-Akhmirovsky stock, wt %

| Компонент                      | 1     | 2     | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      |
|--------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 52.09 | 52.42 | 52.11  | 52.04  | 52.57  | 52.64  | 51.75  | 52.02  |
| SiO <sub>2</sub>               | 30.06 | 30.06 | 30.58  | 30.24  | 30.34  | 30.47  | 30.71  | 30.34  |
| F                              | 17.31 | 16.98 | 17.31  | 17.73  | 17.09  | 16.89  | 17.54  | 17.59  |
| Сумма                          | 99.46 | 99.46 | 100.00 | 100.01 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |

**Таблица 7.** Состав апатитов из литий-фтористых гранитов Ново-Ахмировского штока, мас. %

**Table 7.** Compositions of apatite from lithium-fluoride granites of the Novo-Akhmirovsky stock, wt %

| Компонент                     | 1     | 2     | 3      | 4      | 5     | 6     | 7      |
|-------------------------------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|
| MnO                           | 4.33  | 6.16  | 6.25   | 4.58   | 5.99  | 3.28  | 3.90   |
| CaO                           | 49.00 | 46.82 | 46.94  | 47.62  | 46.69 | 49.04 | 50.46  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 42.14 | 42.32 | 42.53  | 42.94  | 42.48 | 42.23 | 41.80  |
| F                             | 4.25  | 4.61  | 5.09   | 5.08   | 4.23  | 4.74  | 4.53   |
| Сумма                         | 99.71 | 99.91 | 100.81 | 100.22 | 99.40 | 99.29 | 100.69 |

**Таблица 8.** Состав гранатов из литий-фтористых гранитов Ново-Ахмировского штока, мас. %

**Table 8.** Compositions of garnets from lithium-fluoride granites of the Novo-Akhmirovsky stock, wt %

| Компонент                      | 1      | 2      | 3      | 4     | 5     | 6     | 7      |
|--------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|
| SiO <sub>2</sub>               | 36.73  | 35.11  | 35.60  | 35.04 | 35.38 | 35.06 | 36.86  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20.48  | 20.46  | 20.33  | 20.31 | 20.24 | 20.52 | 20.69  |
| FeO                            | 28.57  | 16.58  | 17.34  | 15.48 | 16.34 | 16.40 | 26.15  |
| MnO                            | 12.02  | 27.65  | 27.21  | 28.39 | 27.52 | 27.23 | 13.43  |
| MgO                            | 1.96   | —      | —      | —     | —     | —     | 1.84   |
| CaO                            | 1.19   | 0.32   | 0.38   | 0.41  | 0.32  | 0.35  | 1.60   |
| Сумма                          | 100.96 | 100.12 | 100.86 | 99.63 | 99.80 | 99.57 | 100.57 |

Примечание. Прочерк – отсутствие компонента.

Note. Dash – no component.

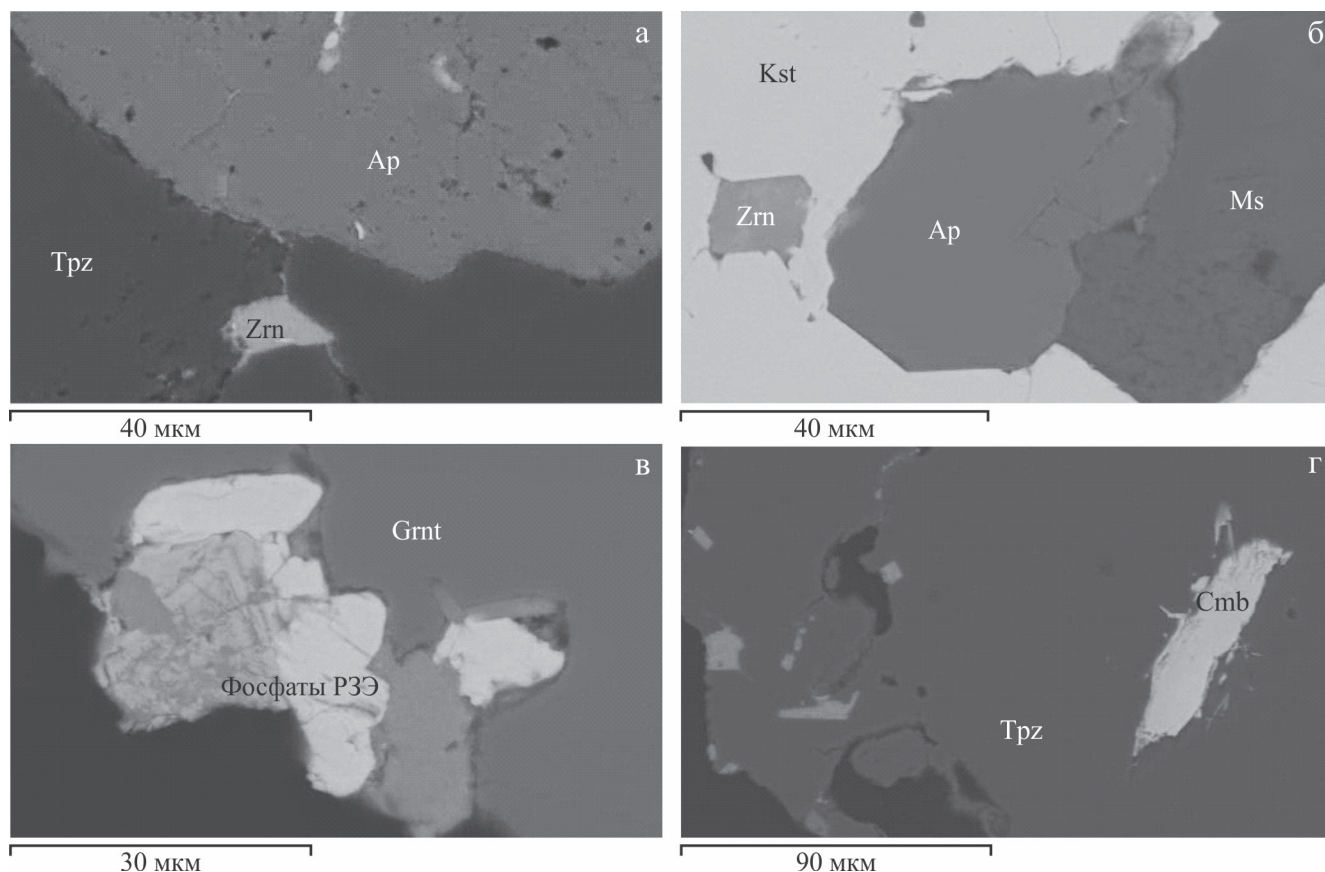
в составе они отвечают следующим минеральным видам – монациту, броккиту, ксенотиму, чералиту, мас. %: P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 12.92–33.04, CaO – 0.35–2.14, Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 21.2–28.9, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 6.61–10.40, Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 10.91–13.30, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 1.32–3.88, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 2.42–3.79, Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 5.13–5.69, Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 4.25–7.41, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 33.4–34.9, ThO<sub>2</sub> – 2.55–14.88, UO<sub>2</sub> – 2.59–4.00. Их детальная идентификация выходит за рамки статьи и требует проведения рентгено-структурных исследований.

В целом набор аксессуарных минералов в гранитах Ново-Ахмировского штока оказался более разнообразным, чем в сподуменовых гранит-порфирах Алахинского штока [Анникова и др., 2016]. Общим для аксессуарного минерального парагенезиса тех и других является наличие апатита, пирита, минералов рода танталит-колумбита, циркона, граната, касситерита, в то же время в гранитах Ново-Ахмировского штока не были диагностированы минералы рода пироклора, но более широко представлены аксессуарные сульфиды: помимо характерного для обоих объектов пирита, здесь определены арсенопирит, сфалерит, галенит и халькопирит. В сподуменовых гранит-

порфирах Алахинского штока не выявлены топаз и фосфаты редкоземельных элементов, что является принципиально важным для понимания их генезиса. Как отмечено ранее, для обоих объектов характерно сходство в составах апатитов, танталит-колумбитов и цирконов: апатит представлен Mn-содержащим F-апатитом, минералы рода танталит-колумбита – манганколумбитом, а в составе цирконов выявлены существенные примеси HfO<sub>2</sub> и UO<sub>2</sub>. Если учесть, что аксессуарные минералы, как правило, кристаллизуются на ранних стадиях отвердевания кремнекислого расплава, то становится очевидным более высокая степень рафинирования (“чистоты”) сподуменовых гранит-порфиров Алахинского штока – экстремально дифференцированных остаточных расплавов, гомологически подобных сподуменовым пегматитам [Загорский и др., 2014; Анникова и др., 2016].

#### Rb/Sr и Ar/Ar ИЗОТОПНЫЙ ВОЗРАСТ

Первые попытки надежного определения возраста гранитов Ново-Ахмировского штока были



**Рис. 7.** Акцессорная минерализация литий-фтористых гранитов Ново-Ахмировского штока. На микрофотографиях, выполненных на сканирующем электронном микроскопе в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE), вынесены наиболее распространенные акцессорные минералы, диагностированные в гранитах Ново-Ахмировского штока: *Tpz* – топаз, *Ap* – апатит, *Cmb* – колумбит, *Zrn* – циркон, *Grnt* – гранат, *Kst* – касситерит.

**Fig. 7.** Accessory mineralization of lithium-fluoride granites of the Novo-Akhmirovsky stock. On the micrographs taken on a scanning electron microscope in the back-scattered electron (BSE) mode, the most common accessory minerals diagnosed in granites of the Novo-Akhmirovsky stock are shown: *Tpz* – topaz, *Ap* – apatite, *Cmb* – columbite, *Zrn* – zircon, *Grnt* – garnet, *Kst* – cassiterite.

предприняты В.И. Масловым и В.Н. Довгалем с соавторами, в чьих статьях приведены следующие результаты Rb-Sr изохронного датирования:  $T = 272 \pm 4$  млн лет,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 = 0.707 \pm 7$ , СКВО = 0.97 [Маслов и др., 1994; Довгаль и др., 1995].

В рамках предпринятого в настоящей статье исследования проведена ревизия геохронологических возрастов на основе  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирования “белых” слюд из литий-фтористых гранитов Ново-Ахмировского штока (табл. 9). Для  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  изотопных исследований осуществлено выделение мономинеральных фракций Li-мусковита и циннвальдита из образцов наиболее свежих гранитов центральной части Ново-Ахмировского штока (обр. КТ-1/4, ВК-16-60) с использованием бинокуляра фирмы LEICA EZ4 (Германия).  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  исследования методом ступенчатого прогрева выполнены в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований

ИГМ СО РАН. Навески образцов, совместно с мусковитом МСА-11 (возраст –  $311.0 \pm 1.5$  млн лет), используемым в качестве монитора и откалиброванным с помощью международных стандартных образцов биотита LP-6 и мусковита Bern-4m [Baksi et al., 1996], заворачивались в алюминиевую фольгу, помещались в кварцевую ампулу и после откачки из нее воздуха запаивались. Затем пробы облучались в кадмированном канале научного реактора ВВР-К типа в Физико-техническом институте при ТПУ (г. Томск). Градиент нейтронного потока не превышал 0.5% в размере образца. Эксперименты по ступенчатому прогреву проводились в кварцевом реакторе с печью внешнего прогрева. Холостой опыт по определению  $^{40}\text{Ar}$  (10 мин при  $1200^\circ\text{C}$ ) не превышал  $5 \cdot 10^{-10}$  нсм<sup>3</sup>. Очистка аргона производилась с помощью ZrAl-SAES-геттеров. Изотопный состав аргона измерялся на масс-спектрометре Noble gas 5400 фирмы “Микро-

**Таблица 9.** Результаты  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирования методом ступенчатого прогрева слюд Ново-Ахмировского интрузивного штока

**Table 9.** Results of the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  step heating dating on the mica of Novo-Akhmirovsky intrusive stock (Eastern Kazakhstan)

| $T, ^\circ\text{C}$                                                                                                                                              | $t, \text{мин}$ | $^{40}\text{Ar}$<br>(STP) | $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ | $\pm 1\sigma$ | $^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ | $\pm 1\sigma$ | $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ | $\pm 1\sigma$ | $^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ | $\pm 1\sigma$ | Ca/K   | $\Sigma^{39}\text{Ar}, \%$ | Возраст,<br>млн лет<br>( $\pm 1\sigma$ ) | $\pm 1\sigma$ |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------|---------------------------------|---------------|---------------------------------|---------------|---------------------------------|---------------|---------------------------------|---------------|--------|----------------------------|------------------------------------------|---------------|
| Гранит главной фазы, Li мусковит, обр. КТ-1/4, $J = 0.003857 \pm 0.000039^*$ ;<br>возраст плато ( $875\text{--}1130^\circ\text{C}$ ) = $272.4 \pm 2.4$ млн лет** |                 |                           |                                 |               |                                 |               |                                 |               |                                 |               |        |                            |                                          |               |
| 500                                                                                                                                                              | 10              | $2.9 \cdot 10^{-9}$       | 56.314                          | 1.199         | 0.02624                         | 0.01890       | 0.0236                          | 0.0357        | 0.00903                         | 0.02400       | 0.0849 | 0.3                        | 339.3                                    | 41.5          |
| 625                                                                                                                                                              | 10              | $15.0 \cdot 10^{-9}$      | 53.181                          | 0.348         | 0.01825                         | 0.00687       | 0.0244                          | 0.0181        | 0.01983                         | 0.00648       | 0.0877 | 1.6                        | 302.5                                    | 11.8          |
| 725                                                                                                                                                              | 10              | $33.0 \cdot 10^{-9}$      | 48.013                          | 0.103         | 0.01636                         | 0.00102       | 0.0158                          | 0.0061        | 0.01495                         | 0.00207       | 0.0568 | 5.1                        | 280.4                                    | 4.5           |
| 800                                                                                                                                                              | 10              | $72.7 \cdot 10^{-9}$      | 44.223                          | 0.049         | 0.01325                         | 0.00149       | 0.0006                          | 0.0026        | 0.00026                         | 0.00241       | 0.0022 | 13.2                       | 283.7                                    | 5.0           |
| 875                                                                                                                                                              | 10              | $290.3 \cdot 10^{-9}$     | 42.519                          | 0.026         | 0.01560                         | 0.00029       | 0.0009                          | 0.0007        | 0.00012                         | 0.00048       | 0.0033 | 47.0                       | 273.8                                    | 2.7           |
| 950                                                                                                                                                              | 10              | $251.2 \cdot 10^{-9}$     | 42.624                          | 0.062         | 0.01571                         | 0.00014       | 0.0001                          | 0.0004        | 0.00114                         | 0.00055       | 0.0004 | 76.2                       | 272.6                                    | 2.8           |
| 1030                                                                                                                                                             | 10              | $117.3 \cdot 10^{-9}$     | 42.409                          | 0.041         | 0.01512                         | 0.00095       | 0.0005                          | 0.0016        | 0.00126                         | 0.00090       | 0.0019 | 89.9                       | 271.1                                    | 3.0           |
| 1130                                                                                                                                                             | 10              | $87.2 \cdot 10^{-9}$      | 42.558                          | 0.051         | 0.01649                         | 0.00077       | 0.0002                          | 0.0023        | 0.00123                         | 0.00052       | 0.0008 | 100.0                      | 272.0                                    | 2.7           |
| Гранит главной фазы, циннвальдит, обр. ВК16-60, $J = 0.003108 \pm 0.000025^*$ ;<br>возраст плато = $250.1 \pm 2.7$ млн лет***                                    |                 |                           |                                 |               |                                 |               |                                 |               |                                 |               |        |                            |                                          |               |
| 1050                                                                                                                                                             | 10              | $2.8 \cdot 10^{-9}$       | 164.913                         | 8.884         | 0.16583                         | 0.06517       | —                               | —             | 0.21805                         | 0.08282       | —      | 0.7                        | 490.3                                    | 106.1         |
| 1130                                                                                                                                                             | 10              | $4.6 \cdot 10^{-9}$       | 123.098                         | 3.705         | 0.10770                         | 0.03565       | —                               | —             | 0.21409                         | 0.02447       | —      | 2.1                        | 307.7                                    | 34.2          |
| 1050                                                                                                                                                             | 10              | $8.7 \cdot 10^{-9}$       | 69.602                          | 0.390         | 0.02787                         | 0.01490       | —                               | —             | 0.03288                         | 0.00432       | —      | 6.9                        | 307.9                                    | 6.6           |
| 1130                                                                                                                                                             | 10              | $17.2 \cdot 10^{-9}$      | 61.927                          | 0.217         | 0.02590                         | 0.00671       | —                               | —             | 0.02612                         | 0.00447       | —      | 17.6                       | 280.9                                    | 6.7           |
| 1050                                                                                                                                                             | 10              | $115.5 \cdot 10^{-9}$     | 55.038                          | 0.069         | 0.01370                         | 0.00196       | —                               | —             | 0.02431                         | 0.00135       | —      | 98.7                       | 250.2                                    | 2.7           |
| 1130                                                                                                                                                             | 10              | $2.8 \cdot 10^{-9}$       | 84.584                          | 8.203         | 0.01389                         | 0.11271       | —                               | —             | 0.26174                         | 0.15236       | —      | 100.0                      | 40.1                                     | 243.5         |

\*J – параметр, характеризующий величину нейтронного потока. \*\*Автор пробы – С.В. Хромых, аналитик А.В. Травин. \*\*\*Авторы пробы – И.Ю. Анникова, А.Г. Владимиров, аналитик А.В. Травин.

\*J – parameter characterizing the magnitude of the neutron flux. \*\*The author of the sample – S.V. Khromykh, analyst A.V. Travin. \*\*\*The authors of the sample – I.Yu. Annikova, A.G. Vladimirov, analyst A.V. Travin.

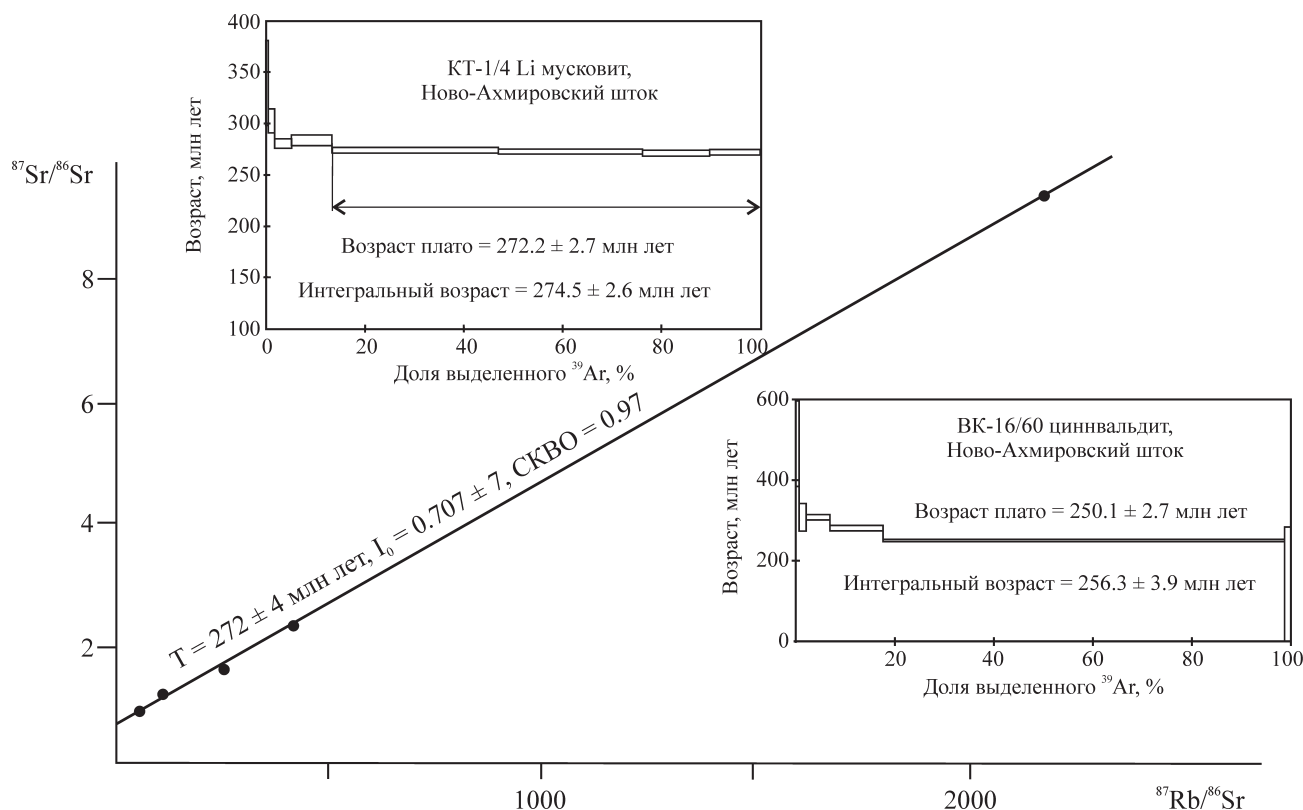
масс” (Англия). Ошибки измерений соответствуют интервалу  $\pm 1\sigma$ . Для коррекции на мешающие изотопы аргона, образовавшиеся во время облучения на Ca, Cl, K, использовались следующие коэффициенты:  $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0.000891 \pm 0.000003$ ,  $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0.000446 \pm 0.000004$ ,  $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 0.089 \pm 0.001$ . Перед измерениями производилась предварительная дегазация образцов при температуре  $350^\circ\text{C}$ . Для контроля изотопной дискриминации масс-спектрометра регулярно измерялись порции очищенного атмосферного аргона. Среднее значение отношения  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  на период измерений составило  $299 \pm 1$ . При интерпретации возрастных и Ca/K спектров использовался метод возрастного плато [Flash et al., 1977], в котором рассчитывается средний взвешенный возраст для нескольких последовательных (не менее трех) температурных ступеней с согласующимися значениями возраста, близкими Ca/K отношениям. Доля выделенного  $^{39}\text{Ar}$ , соответствующего плато, должна быть не менее 50%.

Полученные даты подтвердили предшествующие Rb-Sr оценки и показаны на одном рисунке с Rb-Sr изохронной диаграммой (рис. 8). Обращает на себя внимание, что Rb/Sr (вал – слюды) и Ar/Ar изотопные даты по Li-мусковитам совпадают в пределах аналитической погрешности ( $272 \pm 2$  млн лет), в то время как измеренный циннвальдит не дает устой-

чивого плато на Ar-Ar диаграмме и, вероятнее всего, фиксирует значительно более поздние ( $\geq 20$  млн лет) термальные события в Иртышской сдвиговой зоне.

## ТЕРМОМЕТРИЯ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Для проведения термобарогеохимических исследований первичный отбор проб осуществлялся путем просмотра полированных с двух сторон пластинок, специально изготовленных для данных исследований. Для определения  $P$ - $T$  параметров формирования пород Ново-Ахмировского штока отобраны четыре образца следующих разновидностей пород, слагающих шток: граниты топаз-циннвальдитовые (обр. ВК-16-72), граниты грейзенизированные (обр. ВК-16-66), грейзены по гранитам (обр. ВК-16-67/1) и пегматоиды (обр. ВК-16-69). Из этих проб выделены монофракции кварца по 250 зерен каждая, размером 0.5–1.0 мм, используемые в дальнейшем для прогрева наряду с пластинками. По всем четырем образцам сделаны прогревы при температуре 550 и  $600^\circ\text{C}$  и давлении оксида дейтерия ( $\text{D}_2\text{O}$ ) 1 кбар по методике, описанной в работе [Смирнов и др., 2011]. После каждой стадии прогрева включения изучались с помощью петрографического микроскопа Olympus BX-51 и фотографировались.



**Рис. 8.** Rb-Sr изохронная диаграмма (вал–слюды) и  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  возрастные спектры (литиевый мусковит и циннвальдит) для литий-фтористых гранитов Ново-Ахмировского интрузивного штока.

**Fig. 8.** Rb-Sr isochron diagram (whole rock–mica) and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age spectra (lithium muscovite and zinnwaldite) for lithium-fluoride granites of Novo-Akhmirovsky intrusive stock.

Результаты исследования физико-химических параметров кристаллизации пород Ново-Ахмировского штока сводятся к следующему. Было установлено, что в изученных образцах присутствуют раскристаллизованные расплавные включения в кварце размером около 10 мкм. Крупные включения 20 мкм и более, как правило, окружены ореолом залеченных трещин, содержащих флюидные включения. Это свидетельствует о том, что при охлаждении массива возрастание давления во включениях, обусловленное выделением водного флюида, привело к декрепитации. Прогревы проводились при температуре 550 и 600°C и давлении оксида дейтерия ( $\text{D}_2\text{O}$ ) 1 кбар. Мелкие гомогенные и полностью переплавленные включения, содержащие при комнатной температуре гомогенное стекло или стекло и газовый пузырек, обнаружены во всех рассмотренных образцах после закалки как при 600°C, так и при 550°C. Это свидетельствует о том, что температуры захвата включений и кристаллизации кварца не превышали 600°C. Микроаналитические исследования расплавных включений провести не представилось возможным в силу их слишком мелких размеров.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Калба-Нарымская зона – это главная редкометалльная структура Восточного Казахстана, в которой сосредоточены месторождения и рудопрооявления пегматитового (Ta, Nb, Be, Li и др.), грейзеново-кварцевожильного и кварцевожильного (Sn, W) типов [Щерба и др., 1998; Лопатников и др., 1982; Дьячков, 2012]. В настоящее время эти месторождения отработаны, большая часть законсервирована. Одним из возможных резервов сырьевой базы редких металлов является “внепегматитовый” тип оруденения, связанный с альбитизированными и грейзенизированными гранитами (объекты Карасу, Мало-Черновинский, Ново-Ахмировский, Караузек, Черная Сопка и др.), близкими по текстурно-структурному облику и составу к месторождению Алаха в Горном Алтае [Анникова и др., 2016].

Топаз-циннвальдитовый гранитный шток **Ново-Ахмировский**, а в перспективе – литиевое месторождение, охарактеризован в настоящей статье. Для полноценной характеристики литий-фтористых гранитов и связанного с ним редкометалльного “внепегматитового” оруденения в Вос-

точном Казахстане необходимо упомянуть два рудопрооявления: Черная Сопка и Караузок.

Топаз-флюоритовый гранитный массив **Черная Сопка** [Дьячков, 2012; Джес и др., 2017] расположен в Иртышской зоне смятия и имеет размеры  $4.2 \times 1.2$  км ( $S_{\text{общ}} \approx 5$  км<sup>2</sup>). Массив сложен средними и крупнозернистыми порфировидными биотитовыми гранитами (I фаза), мелкозернистыми и мелко-среднезернистыми биотитовыми гранитами (II фаза) и аплитовидными гранитами (III фаза), отмечаются наиболее поздние жилы аплитов мощностью до 0.3 м, часто сложной ветвящейся формы. По данным гравиметрической съемки, массив на глубине представляет собой вертикальный клиновидный шток с глубиной залегания до 4–5 км. В приповерхностной части фиксируются небольшие субпластовые апофизы этого массива. В продольном разрезе интрузив интерпретируется в виде асимметричного этмолита, северо-западный контакт которого круто (под углом 60–80°) погружается к его центральной части, а на юго-восточном фланге (на глубине 0.2–0.5 км) фиксируется пологозалегающая гранитная апофиза длиной до 3 км.

Визуально это серые порфировидные граниты, среди которых отмечаются линзы и жилообразные тела кварц-слюдистых метасоматитов. Слюда отличается черной окраской, относится к протолиитониту. Минеральный состав варьирует в широких пределах, %: кварц – 15–25, калиевый полевой шпат – 25–60, плагиоклаз – 35–40, биотит – 1–15, мусковит – 0.2–2.0, флюорит – до 2, апатит, ортит и циркон – до 1. Плагиоклаз представлен альбитом, образует зерна с включениями флюорита. В биотите – многочисленные включения микронных (0.01–0.03 мм) кристаллов циркона и более крупных (до 0.15 мм) кристаллов ортита. По химическому составу граниты близки к аляскитам и содержат, %: SiO<sub>2</sub> – 74–76, Na<sub>2</sub>O – 3.45–4.20, K<sub>2</sub>O – 3.66–4.00. Экзоконтактовые роговики развиты широко, подтверждая наличие нескрытой части массива. Повышенные концентрации фтора и лития в гранитах позволяют отнести их к литий-фтористому типу. По результатам анализа методом пламенной фотометрии содержание Li<sub>2</sub>O варьирует от 0.011 до 0.085, Rb<sub>2</sub>O – от 0.11 до 0.21%, по данным экстракционного метода – Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0.0010–0.0058 и Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0.0047–0.0187%. В меланократовых грейзеноподобных кварцево-слюдистых метасоматитах методом пламенной фотометрии установлено максимальное содержание Li<sub>2</sub>O – 0.66% и Rb<sub>2</sub>O – 0.22–0.41%, связанное с протолиитонитом. Здесь не выявлены экономически значимые рудопрооявления и месторождения, однако на глубинных уровнях, особенно связанных со вскрытой скважинами гранитной апофизой на глубине 0.2–0.5 км, следует ожидать Sn-флюоритовое и Li-протолитовое оруденение.

Топазовые риолиты (онгониты) и оловянное рудопрооявление **Караузок** расположены на юго-

востоке от Ново-Ахмировского интрузивного тела (см. рис. 1). Рудопрооявление представлено крупным дайкообразным телом габброидов, рассеченным поперечными кварцевыми прожилками с альбит-флюорит-касситеритовой минерализацией. Отмечаются также онгонитовые дайки. Общие размеры оловоносного штокверка 700 × 400 м. Насыщенность штокверка рудными прожилками неравномерная с плотностью 4–7 на 1 м, мощность их изменяется от 1–2 мм до 1–5 см, редко – более. Кварцевые прожилки имеют параллельное и кулисообразное расположение, протяженность их первые метры и десятки метров. В их составе отмечаются альбит, топаз, мусковит, флюорит и касситерит темно-коричневой окраски.

В рудных кварцевых прожилках по керну скважин установлено содержание, мас. %: Li – 0.010–0.041, Rb – 0.009–0.056, F – 0.43–11.34, Sn – 0.05–8.20. По результатам масс-спектрометрии в брекчированных кварцевых прожилках с касситеритом отмечена повышенная концентрация редких щелочей, г/т: Li – 960, Rb – 637, Cs – 545; редких элементов – Be – 606, Nb – 40, Sn – до 504, W – 88–90. В кварц-флюорит-альбитовых метасоматитах отмечаются следующие значения, г/т: Li – 1450, Rb – 1275, в меньшей степени Cs – 284, Sn – 50, Nb – 27.

Особый интерес представляют дайки топазовых риолитов (онгонитов) с натриевой спецификой щелочей (Na/K = 22/1) и высоким содержанием фтора (2.84–5.85 мас. %). В них отмечается повышенное содержание следующих элементов, г/т: Та – до 20, Nb – 70, W – до 415, Мо – до 32, при содержании Sn – 2.4–28.0. По вещественному составу они относятся к онгонитоподобным породам, чужды габброидам и генетически связаны с глубинным магматическим очагом гранитоидного состава [Дьячков, 2012; Джес и др., 2017].

Таким образом, следует констатировать, что общей геохимической особенностью “внепегматитового” магматогенного редкометалльного оруденения, локализованного в зоне сочленения ИСЗ и центральной части Калба-Нарымской структурно-формационной зоны Восточного Казахстана, является высокая фтористость рудно-магматических систем. Это оруденение, представленное литий-фтористыми гранитами и онгонитами, условно может быть ранжировано на несколько генетических типов в зависимости от глубины кристаллизации расплавов и степени их разгерметизации (отделение рудоносных флюидов) (табл. 10).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные материалы позволяют утверждать, что наибольшее сходство в составах литий-фтористых гранитов и онгонитов Калба-Нарымской редкометалльной провинции обнаруживается с их аналогами месторождения Онгон-Хайерхан в Мон-

**Таблица 10.** *P-T* параметры и динамика формирования литий-фтористых гранитных расплавов и рудоносных магматогенных флюидов (центральная часть Калба-Нарымской зоны, Восточный Казахстан)**Table 10.** *P-T* parameters and dynamics of formation of rare-metal-granite melts and ore-bearing magmatogenic fluids (central part of the Kalba-Narym zone, East Kazakhstan)

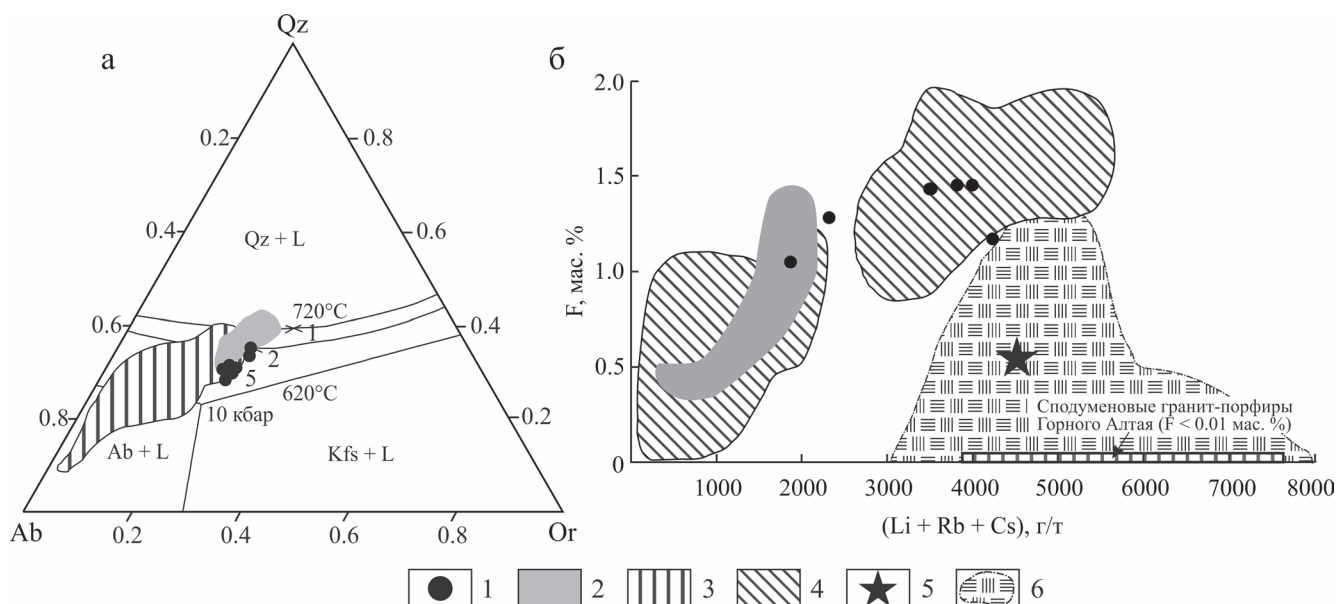
| Генетические типы оруденения | Магматизм                                                                                                                                           | Рудогенез                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1-й                          | Флюорит-топазовые граниты с законсервированными в алюмосиликатной матрице флюорит-протолиитионитовыми включениями и линзами ( $P \approx 2-3$ кбар) | Многофазный гранит-лейкогранитный интрузивный шток Черная Сопка, (“автоклавный эффект”), здесь можно ожидать отделение рудоносных флюидов и Sn рудные штокверки. В слюдистых включениях и зонах содержания $Li_2O$ достигают 0.66 мас. %, что позволяет рассматривать их как перспективный литиевый объект [Дьячков, 2012; Джес и др., 2017] |
| 2-й                          | Гомогенные топаз-циннвальдитовые граниты с маломощной эндоконтактной фацией ( $P_{общ} \approx 1-2$ кбар)                                           | Ново-Ахмировский интрузивный шток (апофиза от гранитоидного батолита, частичная разгерметизация). $Li_2O = 0.42-0.46$ мас. % в топаз-циннвальдитовых гранитах главной фазы. В перспективе – это крупное литиевое месторождение [Маслов и др., 1994; Довгаль и др., 1995; Анникова и др., 2016]                                               |
| 3-й                          | Онгонитовые дайки, пространственно совмещенные с альбит-флюорит-касситерит-кварцевым рудным штокверком ( $P_{общ} \approx 1-1.5$ кбар)              | Sn рудопроявление Караузек, с масштабным отделением магматогенных флюидов (полная разгерметизация) [Дьячков, 2012; Джес и др., 2017]                                                                                                                                                                                                         |
| 4-й                          | Онгонит-эльвановые дайки с закалочными оторочками без следов рудной минерализации ( $P_{общ} \leq 1.0$ кбар)                                        | Чечекский и Ахмировский дайковые пояса (отсутствие дегазации и отделения рудоносных водных флюидов от расплава) [Хромых и др., 2014; Соколова и др., 2016]                                                                                                                                                                                   |

голии [Коваленко, Коваленко, 1976]. Главная особенность тех и других – высокая фтористость и обводненность рудно-магматических систем, что приводит к “альбитовому” тренду фракционирования гранитных расплавов и внедрению онгонитовых даек [Коваленко, Коваленко, 1976; Антипин и др., 2018]. Эти геохимические особенности находят отражение на тройной диаграмме  $Qz-Ab-Or$  (рис. 9а), где вынесены поля составов сподуменовых гранит-порфиров Алахинского штока, онгонитов Чечекского дайкового пояса и фигуративные точки литий-фтористых гранитов Ново-Ахмировского штока. На этой диаграмме поля составов и фигуративные точки указанных пород перекрываются, образуя единый “альбитовый тренд” (см. рис. 9а). По содержанию фтора и сумме редких щелочных элементов ( $Li + Rb + Cs$ ) топаз-циннвальдитовые граниты Ново-Ахмировского штока и сподуменовые гранит-порфиры Алахинского штока резко различаются: составы первых ложатся в поле редкометалльных рудоносных гранитов мира, отчасти перекрывающееся с полем составов онгонитов Восточного Казахстана, а составы вторых образуют очень узкое поле, полностью перекрываемое полем составов сподуменовых пегматитов Сибири и Восточного Казахстана (см. рис. 9б).

Литий-фтористая специализация топаз-циннвальдитовых гранитов Ново-Ахмировского што-

ка и аналогичность составов гранит-порфиров Алахинского штока и сподуменовых пегматитов позволяют рассматривать те и другие как перспективные объекты для возобновления минерально-сырьевой базы лития в Казахстане и России. Первая попытка экономико-геологического анализа Алахинского и Ново-Ахмировского месторождений была предпринята в 1992–1993 гг. в рамках государственных программ развития атомной промышленности Российской Федерации и Республики Казахстан, затем была проведена их переоценка на Всероссийском научно-практическом совещании “Литий России: минерально-сырьевые ресурсы, инновационные технологии, экологическая безопасность” [Владимиров и др., 2012; Ляхов и др., 2012]. В том и другом случаях речь идет о прогнозных запасах и к месторождениям их можно отнести только условно.

Авторы выражают искреннюю признательность канд. геол.-мин. наук С.В. Хромых, канд. геол.-мин. наук П.Д. Котляру и канд. геол.-мин. наук О.Н. Кузьминой за участие в экспедиционных работах и предоставленный для статьи материал по  $Ar-Ar$  изотопному возрасту литий-фтористых гранитов Ново-Ахмировского интрузивного штока; канд. геол.-мин. наук Н.Г. Кармановой и канд. хим. наук И.В. Николаевой (ИГМ СО РАН, г. Новоси-



**Рис. 9.** Нормативные минеральные составы и геохимические тренды литий-фтористых гранитов и онгонитов центральной части Калба-Нарымской зоны (Восточный Казахстан) в сравнении со сподуменовыми гранит-порфирами Алахинского штока (Горный Алтай) и редкометалльными гранитами ведущих рудных районов мира [Антипин и др., 2002; Соколова и др., 2016]. Диаграммы Qz–Ab–Or [Johannes and Holtz, 1996] (a) и (Li + Rb + Cs)–F (б).

1 – топаз-циннвальдитовые граниты Ново-Ахмировского штока, 2 – редкометалльные и ультраредкометалльные онгониты Чечекского пояса [Соколова и др., 2016], 3 – мусковит-сподумен-альбитовые гранит-порфиры Алахинского штока (Горный Алтай) [Анникова и др., 2016], 4 – редкометалльные рудоносные гранитоиды мира, 5 – среднее содержание в редкометалльных промышленных пегматитах [Загорский, Перетяжко, 1992], 6 – контур составов сподуменовых пегматитов Сибири и Восточного Казахстана (авторские данные).

В базу данных (см. условное обозначение 4) включены литий-фтористые граниты и онгониты редкометалльных провинций: Онгон-Хайерхан (W, Sn,  $\pm$ Nb), Монголия; Корнуолл (Sn,  $\pm$ W, Cu, Mo), Англия; Спор-Маунтин (Be), США; Утулик (Sn-W), Прибайкалье; Ары-Булак, Орловка (Ta), Хангилай (W  $\pm$  Sn), Спокойнинское (W), Забайкалье; Тигриное (Sn, W, In), Приморье; Бовуар (Sn, Li, Be, Ta), Франция; Пиа Оак (Sn), Вьетнам; Тоскана, Италия; Базардара (Sn), Таджикистан; Рудные горы (Sn), Германия, Чехия [Антипин и др., 2002; Соколова и др., 2016].

**Fig. 9.** Normative mineral compositions and geochemical trends of lithium-fluorine granites and ongonites of the central part of the Kalba-Narym zone (East Kazakhstan) in comparison with spodumene porphyry granites of the Alakha stock (Gorny Altai) and rare-metal granites of the world's leading ore regions [Antipin et al., 2002; Sokolova et al., 2016]. Qz–Ab–Or [Johannes and Holtz, 1996] (a) and (Li + Rb + Cs)–F (b) diagrams.

1 – topaz-zinnwaldite granites of the Novo-Akhmirovsky stock, 2 – rare-metal and ultra rare-metal ongonites of the Chechek dike belt [Sokolova et al., 2016], 3 – muscovite-spodumene-albite granites of the Alakha stock (Gorny Altai) [Annikova et al., 2016], 4 – rare-metal ore-bearing granitoids of the world, 5 – average content in rare-metal industrial pegmatites [Zagorsky, Peretyazhko, 1992], 6 – composition's contour of the spodumene pegmatites of Siberia and East Kazakhstan (author's data).

The database (see legend 4) includes lithium-fluorine granites and ongonites of rare-metal provinces: Ogon-Khaierhan (W, Sn,  $\pm$ Nb), Mongolia; Cornwall (Sn,  $\pm$ W, Cu, Mo), England; Spore Mountain (Be), USA; Utulik (Sn-W), Baikal; Aru-Bulak, Orlovka (Ta), Khangilay (W  $\pm$  Sn), Spokoininskoe (W), Transbaikalia; Tiger (Sn, W, In), Primorye; Beauvoir (Sn, Li, Be, Ta), France; Pia Oak (Sn), Vietnam; Tuscany, Italy; Bazardara (Sn), Tajikistan; Ore Mountains (Sn), Germany, Czech Republic [Antipin et al., 2002; Sokolova et al., 2016].

бирск) – за аналитические исследования по определению содержания порообразующих оксидов, редких и редкоземельных элементов в редкометалльных гранитах Ново-Ахмировского интрузивного штока, а также канд. геол.-мин. наук В.Г. Томасу – за проведение исследований по термометрии расплавных включений.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН при финансовой поддержке

ке Министерства науки и высшего образования РФ: проект № 5.1688.2017/ПЧ (определение петрогенных, редких и редкоземельных элементов в редкометалльных гранитах Ново-Ахмировского штока), проект № 14.Y26.31.0012 (геохимическая типизация редкометалльных гранитов Ново-Ахмировского штока на основе анализа распределения в них редких и редкоземельных элементов, определение составов порообразующих минералов), Российского фонда фундаментальных исслед-

дований: проект № 16-05-00128а (проведение полевых исследований на Ново-Ахмировском месторождении, исследование акцессорного минерального парагенезиса гранитов Ново-Ахмировского штока), проект № 17-05-00936а ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  изотопные исследования светлых слюд из гранитов Ново-Ахмировского штока).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анникова И.Ю., Владимиров А.Г., Смирнов С.З., Гаврюшкина О.А. (2016) Геология и минералогия Алаштинского месторождения сподуменовых гранитпорфиров (Горный Алтай, Россия). *Геология руд. месторождений*, **58**(5), 451-475.
- Антипин В.С., Кузьмин М.И., Одгэрэл Д., Куш Л.В., Перепелов А.Б. (2018) Геохимическая эволюция и рудносные метасоматиты Бага-Газрынского многофазного массива редкометалльных Li-F гранитов (Монголия). *Докл. АН*, **483**(3), 83-90.
- Антипин В.С., Холлс К., Митичкин М.А., Скотт П., Кузнецов А.Н. (2002) Эльваны Корнуолла (Англия) и Южной Сибири – субвулканические аналоги субщелочных редкометалльных гранитов. *Геология и геофизика*, **43**(9), 847-857.
- Бескин С.М., Загорский В.Е., Кузнецова Л.Г., Курсинов И.И., Павлова В.Н., Прокофьев В.Ю., Цыганов А.Е., Шмакин Б.М. (1994) Этыкинское редкометалльное рудное поле в Восточном Забайкалье (Восточная Сибирь). *Геология руд. месторождений*, **36**(4), 310-325.
- Владимиров А.Г., Выставной С.А., Титов А.В., Руднев С.Н., Дергачев В.Б., Анникова И.Ю., Тикун Ю.В. (1998) Петрология раннемезозойских редкометалльных гранитов юга Горного Алтая. *Геология и геофизика*, **39**(7), 901-916.
- Владимиров А.Г., Ляхов Н.З., Загорский В.Е., Макагон В.М., Кузнецова Л.Г., Смирнов С.З., Исупов В.П., Белозеров И.М., Уваров А.Н., Гусев Г.С., Юсупов Т.С., Анникова И.Ю., Бескин С.М., Шокальский С.П., Михеев Е.И., Котлер П.Д., Мороз Е.Н., Гаврюшкина О.А. (2012) Литиевые месторождения сподуменовых пегматитов Сибири. *Химия в интересах устойчивого развития*, **20**(1), 3-20.
- Владимиров А.Г., Пономарева А.П., Шокальский С.П., Халилов В.А., Костицын Ю.А., Пономарчук В.А., Руднев С.Н., Выставной С.А., Крук Н.Н., Титов А.В. (1997) Позднепалеозойский-раннемезозойский гранитоидный магматизм Алтая. *Геология и геофизика*, **38**(4), 715-729.
- Дергачев В.Б. (1988) Новая разновидность онгонитов. *Докл. АН СССР*, **302**(1), 188-191.
- Джес Е.Н., Дьячков Б.А., Маслов В.И. (2017) О нетрадиционных типах редкометалльного оруденения Восточного Казахстана. *Петрология магматических и метаморфических комплексов. Мат-лы IX Всерос. петрограф. конф. с междунар. участием*. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 140-143.
- Довгаль В.Н., Дистанова А.Н., Саботович С.А., Палеский С.В., Титов А.В., Чупин В.П., Маслов В.И., Козлов М.С. (1995) О происхождении позднепалеозойских литий-фтористых гранитоидов Юго-Западного Алтая. *Геология и геофизика*, **36**(3), 64-72.
- Дьячков Б.А. (2012) Генетические типы редкометалльных месторождений Калба-Нарымского пояса. Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 130 с.
- Загорский В.Е., Владимиров А.Г., Макагон В.М., Кузнецова Л.Г., Смирнов С.З., Дьячков Б.А., Анникова И.Ю., Шокальский С.П., Уваров А.Н., Гаврюшкина О.А. (2014) Крупные поля сподуменовых пегматитов в обстановках рифтогенеза и постколлизийных сдвигово-раздвиговых деформаций континентальной литосферы. *Геология и геофизика*, **2**, 303-322.
- Загорский В.Е., Перетяжко И.С. (1992) Типы и средний состав миароловых пегматитов Малханского хребта. *Геология и геофизика*, **1**, 87-97.
- Коваленко В.И., Коваленко Н.И. (1976) Онгониты (топазсодержащие кварцевые кератофиры) – субвулканические аналоги редкометалльных литий-фтористых гранитов. М.: Наука, 127 с.
- Кудрин В.С., Ставров О.Д., Шурига Т.Н. (1994) Новый сподуменный тип танталоносных редкометалльных гранитов. *Петрология*, **2**(1), 88-95.
- Лопатников В.В., Изох Э.П., Ермолов П.В., Пономарева А.П., Степанов А.Е. (1982) Магматизм и рудоносность Калба-Нарымской зоны Восточного Казахстана. М.: Наука, 247 с.
- Ляхов Н.З., Владимиров А.Г., Исупов В.П. (2012) Литиевые месторождения сподуменовых пегматитов Сибири. *Химия в интересах устойчивого развития*, **20**(1), 1-2.
- Магматические горные породы. Под ред. О.А. Богатикова. Т. 1. Классификация, номенклатура, петрография. Ч. 1. (1983). М.: Наука, 368 с.
- Маслов В.И. (1994) Отчет Зырянской партии о результатах поисков на олово и редкие металлы на участке Диабазовый за 1990–1994 гг. Государственная холдинговая компания “Топаз”. Усть-Каменогорск, 171 с.
- Маслов В.И., Козлов М.С., Довгаль В.Н., Дистанова А.Н. (1994) Комплекс онгонитов и литий-фтористых гранитов юго-западного Алтая. *Петрология*, **2**(3), 331-336.
- Савинский И.А., Владимиров В.Г. (2015) Чечекская гранитоидная структура (Иртышская зона смятия). *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*, **1**(21), 15-22.
- Смирнов С.З., Томас В.Г., Соколова Е.Н., Куприянов И.Н. (2011) Экспериментальное исследование герметичности включений водосодержащих силикатных расплавов при внешнем давлении  $\text{D}_2\text{O}$  при  $650^\circ\text{C}$  и 3 кбар. *Геология и геофизика*, **52**(5), 690-703.
- Соколова Е.Н., Смирнов С.З., Хромых С.В. (2016) Условия кристаллизации, состав и источники редкометалльных магм при формировании онгонитов Калба-Нарымской зоны Восточного Казахстана. *Петрология*, **24**(2), 168-193.
- Таусон Л.В. (1977) Геохимические типы и потенциальная рудоносность гранитоидов. М.: Наука, 280 с.
- Травин А.В., Владимиров В.Г., Мурзинцев Н.Г., Савинский И.А. (2016) Термохронология Иртышской сдвиговой зоны (Центральная Азия). *Корреляция алтаид и уралид: магматизм, метаморфизм, стратиграфия, геохронология, геодинамика и металлогения*. Новосибирск: СО РАН, 184-186.
- Хромых С.В., Соколова Е.Н., Смирнов С.З., Травин А.В., Анникова И.Ю. (2014) Геохимия и возраст редкоме-

- талльных дайковых пород Восточного Казахстана. Докл. РАН, **459**(5), 612-617.
- Циннвальдит. Каталог минералов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.catalogmineralov.ru/mineral/zinnwaldite.html> (дата обращения: 15.03.2019).
- Щерба Г.Н., Дьячков Б.А., Нахтигаль Г.П. (1984) Металлогения Рудного Алтая и Калбы. Алма-Ата: Наука, 239 с.
- Щерба Г.Н., Дьячков Б.А., Стучевский Н.И., Нахтигаль Г.П., Антоненко А.Н., Любецкий В.Н. (1998) Большой Алтай (геология и металлогения). Алматы: Гылым, 304 с.
- Baksi A.K., Archibald D.A., Farrar E. Intercalibration of  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating standards (1996). *Chem. Geol.*, **129**, 307-324.
- Barth T.F. (1961) The feldspar lattices as solvent of foreign ions. *Inst. Lucas Mallada, Cursos y Conferencias*, 3-8.
- Boynton W.V. (1984) Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. *Rare Earth Element Geochemistry*. N. Y.: Elsevier, 63-114.
- Flash R.J., Sutter J.F., Elliot D.H. (1977) Interpretation of discordant  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age-spectra of Mesozoic tholeiites from Antarctica. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **41**, 15-32.
- Johannes W., Holtz F. (1996) Petrogenesis and Experimental Petrology of Granitic Rocks. *Minerals Rocks Ser.*, **22**, 335.
- Seck H.A. (1972) The influence of pressure on the alkali feldspar solvus from peraluminous and persilicic materials. *Fortschritt. Mineral*, **49**, 31-49.
- Sun S.-s., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society Spec. Publ.*, **42**, 313-345.
- Tischendorf G., Gottesmann B., Forster H.J., Trumbull R.B. (1997) On Li-bearing micas: estimating Li from electron microprobe analyses and an improved diagram for graphical representation. *Mineral. Mag.*, **61**(6), 809-834.
- rozhd., **36**(4), 310-325. (In Russian)
- Boynton W.V. (1984) Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. *Rare Earth Element Geochemistry*. N. Y.: Elsevier, 63-114.
- Dergachev V.B. (1988) A new variety of ongonites. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **302**(1), 188-191. (In Russian)
- Dovgal' V.N., Distanova A.N., Sobotovich S.A., Palesskii S.V., Titov A.V., Chupin V.P., Maslov V.I., Kozlov M.S. (1995) On the origin of late Paleozoic lithium-fluorine granitoids of South-Western Altai. *Geol. Geofiz.*, **36**(3), 64-72. (In Russian)
- D'yachkov B.A. (2012) *Geneticheskie tipy redkometall'nykh mestorozhdenii Kalba-Narymskogo poyasa* [Genetic types of rare-metal deposits of Kalba-Narym belt]. Ust'-Kamenogorsk, VKGTU Publ., 130 p. (In Russian)
- Flash R.J., Sutter J.F., Elliot D.H. (1977) Interpretation of discordant  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age-spectra of Mesozoic tholeiites from Antarctica. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **41**, 15-32.
- Jess E.N., Dyachkov B.A., Maslov V.I. (2017) On non-traditional types of rare-metal mineralization of East Kazakhstan. *Mat-ly Vseros. petrograf. konf. s mezhdunar. uchastiem. "Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov"* [Materials IX all Russian. petrographer. Conf. with international. participation. "Petrology of magmatic and metamorphic complexes"]. Tomsk, Tomsk TsNTI Publ., 140-143. (In Russian)
- Johannes W., Holtz F. (1996) Petrogenesis and Experimental Petrology of Granitic Rocks. *Minerals Rocks Ser.*, **22**, 335.
- Khromykh S.V., Sokolova E.N., Smirnov S.Z., Travin A.V., Annikova I.Yu. (2014) Geochemistry and age of rare-metal dyke rocks of East Kazakhstan. *Dokl. Akad. Nauk*, **459**(5), 612-617. (In Russian)
- Kovalenko V.I., Kovalenko N.I. (1976) *Ongonity (topaz-soderzhashchie kvartsevye keratofiry) – subvolkanicheskie analogi redkometall'nykh litii-floristykh granitov* [Ongonites (Topaz-containing quartz keratophyres) are the subvolcanic analogues of rare metal lithium-fluorine granites]. Moscow, Nauka Publ., 127 p. (In Russian)
- Kudrin V.S., Stavrov O.D., Shuriga T.N. (1994) A new spodumene type of tantalum-bearing rare metal granites. *Petrologiya*, **2**(1), 88-95, (In Russian)
- Lopatnikov V.V., Izokh E.P., Ermolov P.V., Ponomareva A.P., Stepanov A.E. (1982) *Magmatizm i rudonosit' Kalba-Narymskoi zony Vostochnogo Kazakhstana* [Magmatism and ore content of Kalba-Narym zone of East Kazakhstan]. Moscow, Nauka Publ., 247 p. (In Russian)
- Lyakhov N.Z., Vladimirov A.G., Isupov V.P. (2012) Lithium deposits of spodumene pegmatites of Siberia. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, **20**(1), 1-2. (In Russian)
- Magmaticheskie gornye porody. (Pod red. O.A. Bogatikova). T. 1. Klassifikatsiya, nomenklatura, petrologiya. Ch. 1* [Igneous rocks. (Ed. O.A. Bogatikov). V. 1. Classification, nomenclature, petrography. Pt 1]. (1983) Moscow, Nauka Publ., 368 p. (In Russian)
- Maslov V.I., Kozlov M.S., Dovgal V.N., Distanova A.N. (1994) complex of ongonites and lithium-fluoride granites of South-Western Altai. *Petrologiya*, **2**(3), 331-336. (In Russian)
- Maslov V.I. (1994) *Otchet Zyryanovskoi partii o rezul'tatakh poiskov na olovo i redkie metally na uchastke Diabazovyi*

- za 1990–1994 gg. [The Report of Zyryanovsk party on the results of the search for tin and rare metals on the site Diabase for 1990–1994]. Ust'-Kamenogorsk, State holding company "Topaz", 171 p. (In Russian)
- Savinsky I.A., Vladimirov V.G. (2015) Chechek granite-gneiss structure (Irtysh zone of crumpling). *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri*, **1**(21), 15-22. (In Russian)
- Seck H.A. (1972) The influence of pressure on the alkali feldspar solvus from peraluminous and persilicic materials. *Fortschritt. Mineral*, **49**, 31-49.
- Shcherba G.N., D'yachkov B.A., Nakhtigal' G.P. (1984) *Metallogeniya Rudnogo Altaya i Kalby* [Metallogeny of Rudny Altai and Kalba]. Alma-Ata, Nauka Publ., 239 p. (In Russian)
- Shcherba G.N., D'yachkov B.A., Stuchevsky N.I., Nakhtigal' G.P., Antonenko A.N., Lyubetsky V.N. (1998) *Bol'shoi Altai (geologiya i metallogeniya)* [Great Altai: (Geology and metallogeny)]. Almaty, Gylm Publ., 304 p. (In Russian)
- Smirnov S.Z., Thomas V.G., Sokolova E.N., Kupriyakov I.N. (2011) Experimental study of tightness of inclusions of water-containing silicate melts at external pressure D<sub>2</sub>O at 650°C and 3 kbar. *Geol. Geofiz.*, **52**(5), 690-703. (In Russian)
- Sokolova E.N., Smirnov S.Z., Khromykh S.V. (2016) Conditions of crystallization, composition and sources of rare-metal magmas in the formation of ongonites of Kalba-Narym zone of East Kazakhstan. *Petrologiya*, **24**(2), 168-193. (In Russian)
- Sun S.-s., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society Spec. Publ.*, **42**, 313-345.
- Tischendorf G., Gottesmann B., Forster H.J., Trumbull R.B. (1997) On Li-bearing micas: estimating Li from electron microprobe analyses and an improved diagram for graphical representation. *Mineral. Mag.*, **61**(6), 809-834.
- Towson L.V. (1977) *Geokhimicheskie tipy i potentsial'naya rudonosnost' granitoidov* [Geochemical types and potential ore content of granitoids]. Moscow, Nauka Publ., 280 p. (In Russian)
- Travin A.V., Vladimirov V.G., Murzyntsev N.G., Savinsky I.A. (2016) Thermochronology Irtysh shear zone (Central Asia). *Korrelyatsiya altaid i uralid: magmatizm, metamorfizm, stratigrafiya, geokhronologiya, geodinamika i metallogeniya* [Correlation of Altaic and Uralic: magmatism, metamorphism, stratigraphy, geochronology, geodynamics and metallogeny]. Novosibirsk, SB RAS, 184-186. (In Russian)
- Vladimirov A.G., Lyakhov N.Z., Zagorsky V.Ye., Makagon V.M., Kuznetsova L.G., Smirnov S.Z., Isupov V.P., Belozero I.M., Uvarov A.N., Gusev G.S., Yusupov T., Annikova I.Yu., Beskin S., Shokalsky S., Mikheev E.I., Kotler P.D., Moroz E.N., Gavryushkina O.A. (2012) Lithium deposits of spodumene pegmatites of Siberia. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, **20**(1), 3-20. (In Russian)
- Vladimirov A.G., Ponomareva A.P., Shokalsky S.P., Khalilov V.A., Kostitsyn Y.A., Ponomarchuk V.A., Rudnev S.N., Vystavnoi S.A., Crook N.N., Titov A.V. (1997) Late Paleozoic-early Mesozoic granitoid magmatism in Altai. *Geol. Geofiz.*, **38**(4), 715-729. (In Russian)
- Vladimirov A.G., Vystavnoi S.A., Titov A.V., Rudnev S.N., Dergachev V.B., Annikova I.Yu., Tikunov Yu.V. (1998) Petrology of early Mesozoic rare-metal granites of the South of the Altai Mountains. *Geol. Geofiz.*, **39**(7), 901-916. (In Russian)
- Zagorsky V.E., Peretyazhko I.S. (1992) Types and average composition of myarolic pegmatites of the Malkhan ridge. *Geol. Geofiz.*, **1**, 87-97. (In Russian)
- Zagorsky V.E., Vladimirov A.G., Makagon V.M., Kuznetsova L.G., Smirnov S.Z., Dyachkov B.A., Annikova I.Yu., Shokal'sky S.P., Uvarov A.N., Gavryushkin O.A. (2014) Large fields of spodumene pegmatites in the conditions of rifting and in post-collisional deformation of the continental lithosphere. *Geol. Geofiz.*, **2**, 303-322. (In Russian)
- Zinnwaldite. Catalogue of minerals [Electronic resource]. URL: <http://www.catalogmineralov.ru/mineral/zinnwaldite.html> (date accessed: 15.03.2019)