

УДК 552.11

ЭВОЛЮЦИЯ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ Li–F ГРАНИТНЫХ МАГМ В ОЧАГАХ РУДНО-МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОЛОВО-ВОЛЬФРАМОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТИГРИНОГО И ЗАБЫТОГО (ЦЕНТРАЛЬНЫЙ СИХОТЭ-АЛИНЬ, ПРИМОРЬЕ)¹

© 2023 г. О. А. Гаврюшкина^{a, b, *}, Е. Н. Соколова^a, С. З. Смирнов^a,
Н. Н. Крук^{a, b}, А. В. Пономарчук^a, В. Г. Томас^a

^aИнститут геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, пр. академика Коптюга, 3,
Новосибирск, 630090 Россия

^bНовосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090 Россия

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

Поступила в редакцию 21.02.2023 г.

После доработки 05.03.2023 г.

Принята к публикации 10.03.2023 г.

В статье рассмотрены петрографические и геохимические особенности пород штоков Тигриный и Забытый, приведен их минеральный состав, подробно изучен состав слюд, описаны исследования включений минералообразующих сред в кварце. Показано, что развитие рудно-магматических систем (РМС) месторождений Забытое и Тигриное связано с одинаковыми редкометалльными Li–F магмами. Подтверждено, что гранитоиды штока Тигринового можно считать более дифференцированными аналогами гранитоидов штока Забытого. Приводятся новые данные, касающиеся различий в истории магматического этапа развития их РМС. Эволюция магм обоих месторождений проходила при высоком флюидном давлении. Различия в масштабах оруденения двух рассматриваемых РМС могли быть обусловлены разным флюидным режимом эволюции магматических очагов и более существенным участием в развитии Тигриной РМС потоков трансмагматических флюидов.

Ключевые слова: редкометалльные граниты, расплавные включения, флюидные включения, олово, вольфрам, слюды, протолитионит, циннвальдит

DOI: 10.31857/S0016777023060047, **EDN:** SGLFID

ВВЕДЕНИЕ

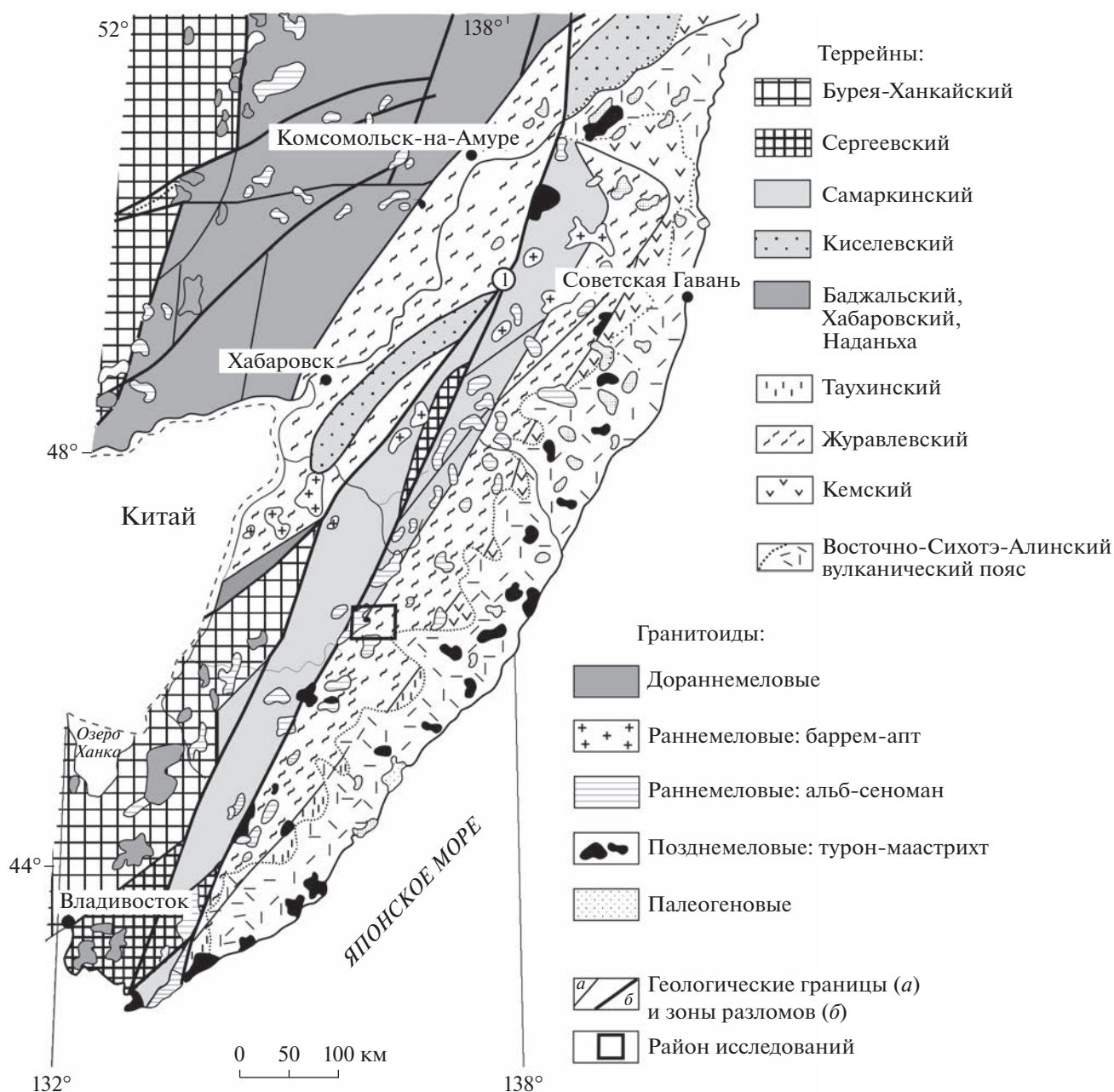
Традиционно с проявлениями редкометалльного магматизма Li–F типа связывают высокий рудный потенциал. Часто массивы таких гранитоидов, даже небольшого размера, сопровождаются месторождениями или проявлениями Sn, Sn–W и W–Mo минерализации. Однако, несмотря на одинаковый геохимический тип гранитоидов, различные массивы примерно одинакового объема могут резко различаться по масштабам ассоциирующего оруденения. Причины таких различий остаются пока неясными.

В подавляющем большинстве случаев массивы Li–F гранитоидов и связанные с ними месторождения приурочены либо к магматическим поясам активных окраин континентов, либо к областям внутриплитной активизации. Объектами нашего исследования стали гранитоиды двух Sn–W руд-

но-магматических систем (месторождения Тигриное и Забытое), расположенных в Центральном Сихотэ-Алине.

Сихотэ-Алинский орогенный пояс представляет собой коллаж террейнов различной природы и возраста, сформированный на восточной окраине Азиатского континента в результате его взаимодействия с океанической литосферой Палеопаифики в мезозое–раннем кайнозое. В истории пояса выделяются несколько этапов, связанных с неоднократной сменой субдукционных (погружение океанической литосферы под край континента) и трансформных (крупно-амплитудные сдвиги вдоль границы “континент–океан” по системе разломов Тань Лу) обстановок (Ханчук, 1993; Khanchuck et al., 2016). Формирование пояса сопровождалось многочисленными проявлениями разновозрастного базитового и гранитоидного магматизма, в том числе – редкометалльных гранитоидов, продуктивных на Sn, W и Mo. Примерами проявлений такой минерализации в пределах Центрального Сихотэ-Алиня

¹ Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.31857/S0016777023060047 для авторизованных пользователей.



Фиг. 1. Геолого-тектоническая схема южной части Сихотэ-Алинского орогенного пояса и смежных территорий (по (Геодинамика..., 2006)).

являются месторождения Тигриное и Забытое (фиг. 1). Оба месторождения сопряжены со штоками редкометалльных Li–F гранитоидов и локализованы в зонах грейзенизации и связанных с ними жильных сериях.

Месторождение Тигриное представляет собой крупное Sn–W месторождение, основные запасы которого были сосредоточены в грейзеновой залежи и сопряженной с ней серии жил. Месторождение хорошо изучено, его геологическое строение, минеральный состав пород и руд, особенности

эволюции и составов рудоносных флюидов и редкометалльных расплавов представлены в (Руб и др., 1998; Гоневчук и др., 2005; Крылова и др., 2012; Смирнов и др., 2014; Крук и др., 2022).

Месторождение Забытое характеризуется существенно меньшим масштабом грейзенизации, а его полезная минерализация сосредоточена в серии жил субмеридионального простираения, пересекающей западную часть массива. В отличие от Тигрино, месторождение Забытое охарактеризовано значительно слабее (Руб, Руб, 2006).

Таким образом, оба месторождения являются примерами различных по масштабам проявлений редкометалльной минерализации, сопряженных с интрузиями однотипных редкометалльных литий-фтористых гранитоидов.

В данной работе сделана попытка определить причины различия в рудоносности Тигриного и Забытого массивов на основании новых изотопно-геохимических, минералогических данных и результатов исследования флюидных и расплавных включений в кварце.

МЕТОДИКА

Определение химического состава минералов (слюды, полевые шпаты) и стекол расплавных включений проводилось на рентгеноспектральном электронно-зондовом микроанализаторе Cameca Camebax Micro и JEOL JXA-8100. Некоторые анализы выполнены методом энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Tescan Mira 3 LMU и JEOL JSM-6510LV (ЦКП МИИ ИГМ СО РАН, г. Новосибирск).

Анализ проводился при ускоряющем напряжении 20 кВ. Для минералов устанавливалась сила тока зонда 30–50 нА и диаметр электронного пучка 2–4 мкм, для РВ ток был уменьшен до 10 нА, а диаметр пучка увеличен до 5 мкм. Для калибровки приборов использовался набор хорошо охарактеризованных внутрилабораторных стандартов (альбит (Na, Al), ортоклаз (K), фтор-флогопит (F), диопсид (Ca, Mg, Si)). Пределы обнаружения для элементов-примесей, 3σ (мас. %): FeO 0.05, MnO 0.07, BaO 0.24, Na₂O 0.14, MgO 0.07, Rb₂O 0.27, K₂O 0.03, CaO 0.02, TiO₂ 0.07, P₂O₅ 0.13, Cs₂O 0.06, F 0.2, Cl 0.01.

Для ЭДС анализов ток зонда составлял 1 нА, диаметр зонда 10 нм, анализ проводился сканированием площадки 5×5 мкм. Живое время набора спектра составляло 60 с. Стабильность параметров съемки контролировалась периодическим измерением интенсивности линии K_{α} чистого кобальта. Правильность полученных результатов контролировалась периодической съемкой стандартов, использованных при калибровке.

При расчете концентраций учитывалось, что в ходе анализа водосодержащих силикатных стекол происходит потеря Na (Morgan, London, 2005).

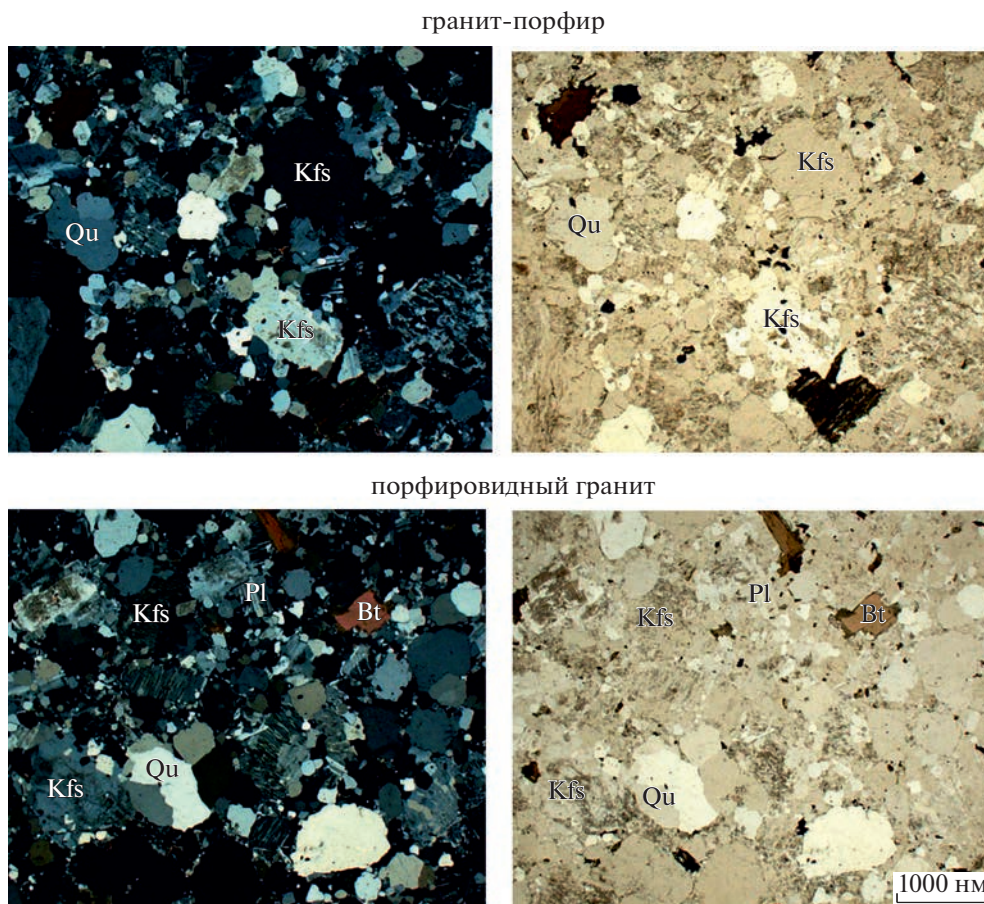
Содержание воды оценивалось либо по недостатку суммы, либо через определение содержания избыточного кислорода. При использовании метода ЭДС кислород измеряется непосредственно в ходе анализа. Калибровка содержания кислорода осуществляется по стандарту чистого Al₂O₃. Избыточным здесь называется кислород, содержание которого выше необходимого по стехиометрии для оксидов металлов и кремния. По-

лагая, что концентрации Li, Be и B, не определяемых методом ЭДС, в расплавах невелики, можно считать, что весь избыточный кислород относится к растворенной в стекле воде. Детали методики пересчета описаны в (Котов и др., 2021).

Исследование состава газов во флюидных включениях проводилось методом рамановской спектроскопии (или КР-спектроскопии) на спектрометре Horiba Lab Ram HR 800 с полупроводниковым детектором Andor, охлаждаемым методом Пельтье (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Возбуждение проводилось твердотельным лазером с длиной волны 532 нм и мощностью 50 мВт.

Прогрев расплавных включений проводился в пластинках и зернах кварца в автоклаве под давлением тяжелой воды 1 кбар в соответствии с методикой (Смирнов и др., 2011). Длительность прогрева составляла 2 суток. Была проведена серия экспериментов со ступенчатым подъемом температуры в диапазоне 525–750°C. Для контроля герметичности включений после прогревов методом рамановской спектроскопии определялось присутствие D₂O в их стеклах. В расчет брались только те расплавные включения, стекла которых не содержали D₂O.

С целью уточнения возрастного интервала формирования пород было проведено ⁴⁰Ar/³⁹Ar изотопное датирование монофракций слюд из исследованных гранитоидов (ЦКП МИИ ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Облучение проб было проведено в кадмированном канале научного реактора ВВР-К типа в Научно-исследовательском институте ядерной физики, г. Томск. Градиент нейтронного потока за период облучения не превышал 0.5% в размере образца. В качестве монитора используется стандартный K/Ar образец мусковит MCA-11 (ОСО No 129-88), подготовленный Всесоюзным научно-исследовательским институтом минерального сырья Министерства геологии СССР (ВИМС) в 1988 году. Для его калибровки в качестве ⁴⁰Ar/³⁹Ar монитора использовались международные стандартные образцы мусковит Bern 4m и биотит LP-6 (Baksi et al., 1996). По результатам калибровки в качестве возраста мусковита MCA-11 было принято среднее, которое составило 311.0 ± 1.5 млн лет (Травин, 2016). Значение полной постоянной распада ⁴⁰K, в соответствии с (Steiger, Jager, 1977), принималось равным 5.543×10^{-10} год⁻¹. Холостой опыт по определению ⁴⁰Ar (10 мин при 1200°C) не превышал 5×10^{-10} нсм³. Очистку аргона производили с помощью Ti- и ZrAl-SAES-геттеров. Дополнительная очистка осуществлялась с помощью кварцевого аппендикса, погруженного в жидкий азот. Изотопный состав аргона измерялся на масс-спектрометре Noble gas 5400 фирмы Микромасс (Англия). Для коррекции на изотопы ³⁶Ar, ³⁷Ar, ⁴⁰Ar, полученные при облучении Ca, K, использованы следующие



Фиг. 2. Микрофотографии шлифов магматических пород штока Забытый (левый ряд – николи скрещены, правый – без анализатора).

коэффициенты: ($^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}$) Ca = 0.000891 ± 0.000005 , ($^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}$) Ca = 0.000446 ± 0.000006 , ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) K = 0.089 ± 0.001 . Особое внимание уделялось контролю фактора изотопной дискриминации с помощью измерения порции очищенного атмосферного аргона. Среднее значение отношения $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ на период измерений составило 295.5 ± 0.5 . Нагревание образца происходило в кварцевом реакторе, помещенном в резистивную печь. Датирование производилось методом ступенчатого прогрева. Контроль температуры осуществлялся посредством хромель-алюмелевой термопары. Точность регулировки температуры составляла $\pm 1^\circ\text{C}$.

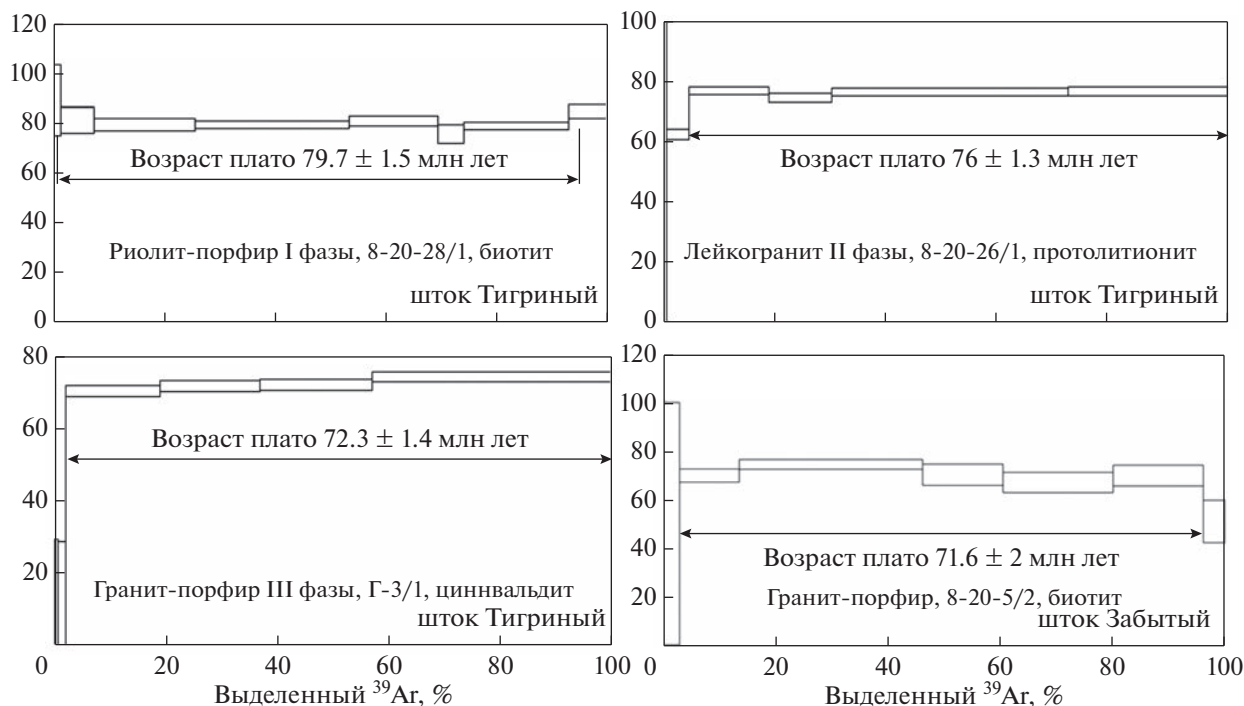
ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ, СТРОЕНИЕ, ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ВОЗРАСТ

Шток Забытый

Шток Забытый, к которому приурочено Sn–W–Be месторождение, находится в центральной части Сихотэ-Алиня в среднем течении р. Боль-

шая Уссурка (Иман). Шток прорывает терригенные песчано-сланцевые отложения валанжинского яруса (K_1) в пределах Журавлевского террейна. Центральная часть штока Забытый сложена порфировидными крупно-среднезернистыми лейкократовыми гранитами с фенокристаллами кварца, калиевого полевого шпата и, существенно реже, альбита, составляющих в сумме 20–30% породы (фиг. 2). Основная масса сложена примерно равными количествами кварца, микропертитового калиевого полевого шпата и кислого плагиоклаза. Кроме этого она содержит 5–7% темной слюды.

В краевых частях шток сложен риолитами субвулканического облика и среднезернистыми гранит-порфирами. Доля фенокристаллов в них по сравнению с порфировидными гранитами больше (до 50%), но в отличие от последних редкие зерна темной слюды встречаются среди вкрапленников. Состав и строение основной массы аналогичны порфировидным гранитам.



Фиг. 3. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ исследований пород штоков Тигриный и Забытый.

Акцессорными минералами в гранитах и гранит-порфирах Забытого являются циркон, ксенотим, редкий апатит и топаз.

Оруденение сосредоточено в жилообразных телах кварц-топазовых грейзенов с касситеритом и вольфрамитом и нескольких пегматитовых жилах, содержащих берилл, топаз и касситерит. Основная часть рудных тел сосредоточена вблизи западной оконечности массива и приурочена к системе трещин субмеридионального простиранья.

Возраст гранитов, по данным (Руб, Руб, 2006), составляет 73 ± 5 млн лет (Rb–Sr изохрона по породам и минералам). Проведенное в данной работе изотопное $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование слюд показало, что гранит-порфиры периферии штока имеют возраст 71.6 ± 2 млн лет (фиг. 3).

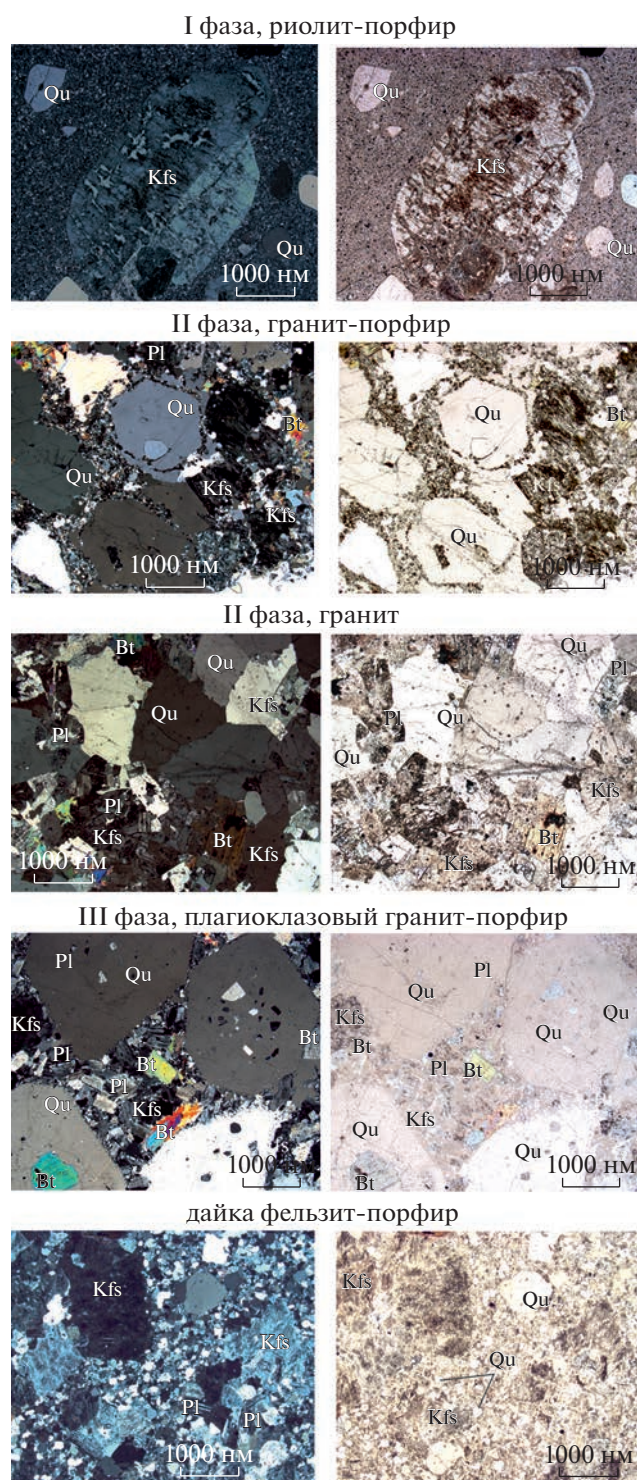
Шток Тигриный

Тигриный интрузив также расположен в центральной части Сихотэ-Алиня в правом борту р. Тигриная – левого притока р. Дальняя (Татиби) на стыке Самаркинского и Журавлевского террейнов, разделенных Центральным Сихотэ-Алинским и Тигринным разломами. На современном уровне эрозионного среза гранитоиды массива Тигринога обнажены в виде двух изолированных штоков – Большого (нижнего) и Малого (верхнего). Вмещающими породами для них являются валланжинские (K_1) терригенные толщи.

Породы Большого штока относятся к ранней (I) интрузивной фазе и представлены светло-серыми риолит-порфирами с порфировыми выделениями и гломеропорфировыми сростками кварца (35–40%) и полевых шпатов (60–65%) с редкими (до 2–3%) лейстами темной слюды (фиг. 4). Среди полевых шпатов во вкрапленниках преобладает микроклин, а альбит встречается в резко подчиненных количествах. Структура основной массы риолит-порфиров фельзитовая, в периферических частях штока – афанитовая.

Породы Малого штока прорывают риолит-порфиры Большого штока на глубине и относятся ко II интрузивной фазе. В апикальной части Малый шток сложен порфировидными гранитами, фациально переходящими в гранит-порфиры с вкрапленниками кварца (фиг. 4), реже калишпата и альбита. Среди вкрапленников присутствуют тонкие частично ограненные лейсты светлой слюды. Основная масса сложена кварцем, калиевым полевым шпатом и кислым плагиоклазом примерно в равных отношениях. В небольшом количестве (5–7%) присутствует розовато-коричневая слюда.

Скважинами вскрыты мелкозернистые порфировидные граниты III фазы, не обнажающиеся на поверхности (Гоневчук и др., 2005). Редкие крупные порфировые выделения в них сложены кварцем и реже калиевым полевым шпатом с включениями плагиоклаза, кварца и слюды. Доминируют мелкие вкрапленники кислого плагио-



Фиг. 4. Микрофотографии шлифов магматических пород штока Тигриный (левый ряд — николи скрещены, правый — без анализатора).

клаза, кварца и светлой слюды. Основная масса сложена альбитом и кварцем в примерно равных количествах, как второстепенный минерал встречается светлая слюда.

Акцессорными минералами гранитоидов Тигриного штока являются циркон, топаз, флюорит, касситерит, пирит, редко — апатит. По данным (Руб и др., 1998), встречаются также ксенотим, рутил, анатаз, колумбит, арсенопирит и молибденит.

Оруденение Тигриного интрузива представлено массивными олово-вольфрамовыми грейзенами и кварцевыми жилами (Коростелев и др., 1990; Руб и др., 1998; Томсон и др., 1996; Gonevchuk et al., 1998). Основное рудное тело грейзенов — залежь Тигренок — расположено в центральной части Малого штока, выше контакта гранитов II и III фаз (Гоневчук и др., 2005).

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование биотита из риолит-порфира Большого штока дало возраст 79.6 ± 2 млн лет, протолигнита из порфировидного гранита (II фаза) Малого штока — 76 ± 1 млн лет, а протолигнита из плагиоклазового порфировидного гранита глубинной части Малого штока (III фаза) — 72 ± 2 млн лет (фиг. 3).

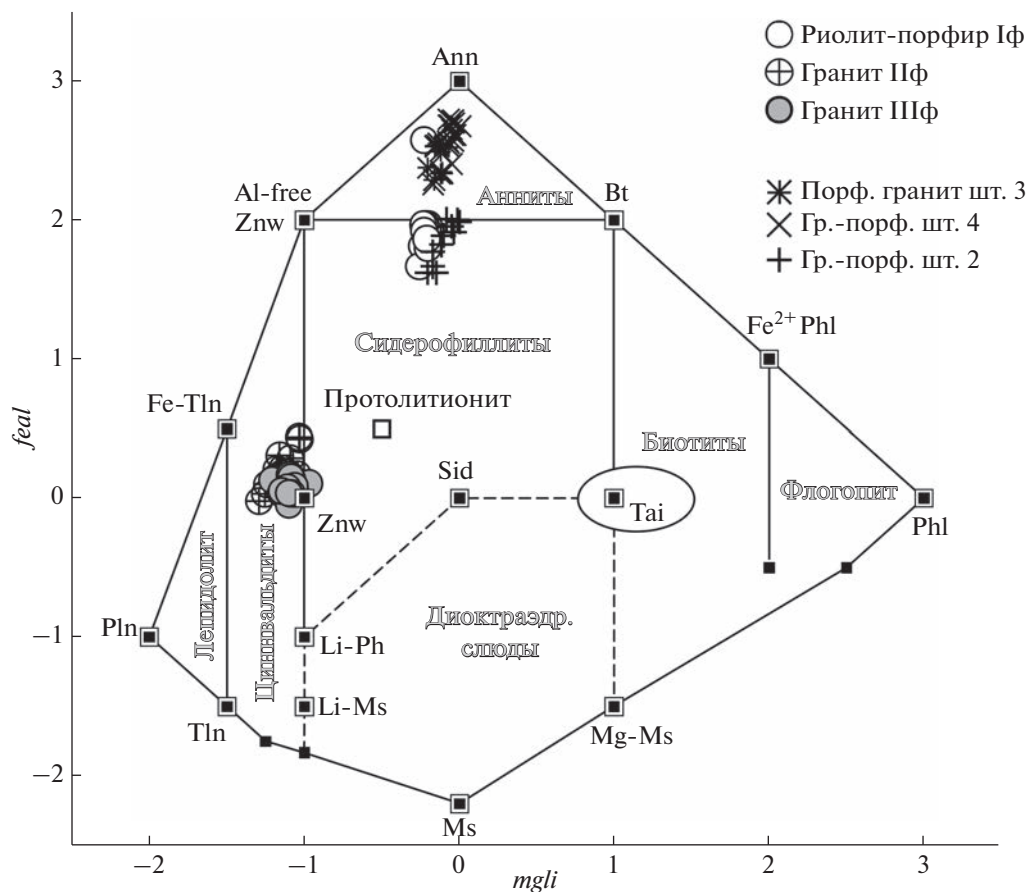
Состав слюд в гранитоидах

Слюды из гранитоидов штока Забытого образуют несколько дискретных групп в области составов сидерофиллитов и аннитов (фиг. 5). Слюды гранит-порфиров краевых фаций штока, вскрытых штольной 2, обогащены MgO (от 1.69 до 2.31 мас. %) и обеднены MnO (1.03–1.23 мас. %) и Cl (0.13–0.35 мас. %). Слюды порфировидных гранитов, вскрытых штольной 3, и гранит-порфиров, вскрытых штольной 4, обладают близкими составами, отвечающими высокожелезистым и низкоглиноземистым аннитам ($f_{\text{до}}$ 0.96). Среди всех слюд штока Забытого они наиболее обеднены MgO (1.41–1.64 мас. %) и обогащены MnO (1.30–1.44 мас. %) и Cl (0.29–0.42 мас. %). Содержание F в слюдах гранитоидов Забытого варьирует от 1.18 до 2.51 мас. %. На фиг. 6 заметна тенденция к росту содержания фтора в слюдах на фоне снижения концентраций хлора.

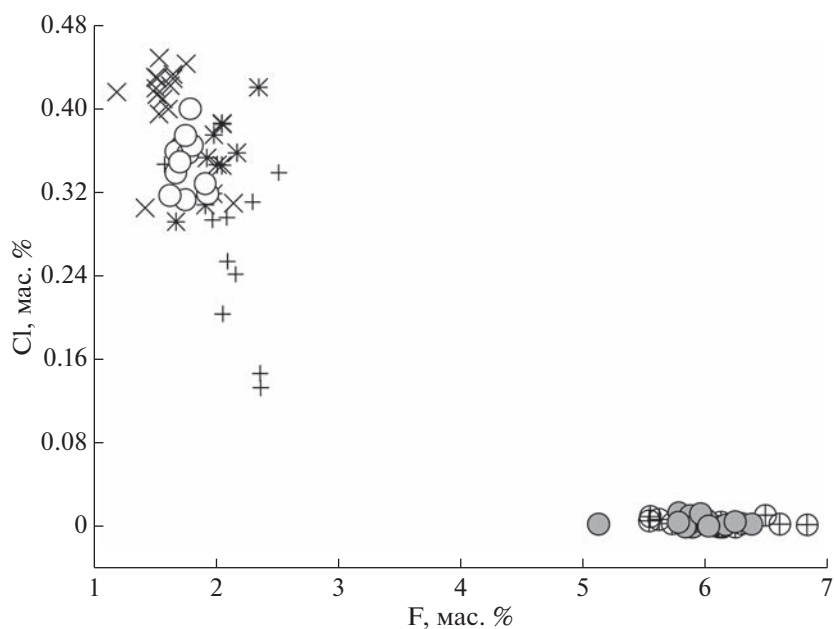
По содержанию Li сидерофиллиты и анниты гранит-порфиров и порфировидных гранитов, отобранных в штольнях, близки. Его оценочное содержание не превышает 1.33 мас. % Li_2O .

По составу к слюдам гранитов Забытого близки слюды пород I фазы штока Тигриный. На диаграмме (фиг. 5) точки их составов тяготеют к тем же дискретным группам, на которые разделились точки составов слюд Забытого. Для них характерны чуть более высокие содержания Li_2O и близкие — Rb_2O , хлора и фтора. Большая часть составов слюд I фазы Тигриного относится к высокожелезистым сидерофиллитам и образует слабо выраженный тренд в сторону протолигнита.

В гранитоидах Малого штока, относящихся ко II и III фазам внедрения, в составе пород присутствуют светлые (кремовые) слюды, составы кото-



Фиг. 5. Классификация триоктаэдрических и диоктаэдрических слюд гранитоидов штоков Забытый и Тигриный в пересчете на переменные $mgli$ (Mg–Li, ф.е.) и $feal$ ($^{VI}Fe_{tot} + Mn + Ti - ^{VI}Al$, ф.е.).



Фиг. 6. Соотношения содержаний фтора и хлора в слюдах из пород штоков Забытый и Тигриный, условные обозначения — см. фиг. 5.

рых попадают в поле циннвальдитов (фиг. 5). При этом составы слюд II фазы характеризуются несколько более высокой железистостью, и точки их составов выстраиваются в линию, протягивающуюся от крайних составов слюд гранитов I фазы к полилиту. В отличие от них, слюды гранитов III фазы образуют компактную группу вблизи идеального состава циннвальдита. То есть они отличаются чуть меньшей железистостью и содержанием лития.

Светлые слюды гранитов Малого штока резко обогащены фтором (5.54–6.83 и 5.12–6.38 мас. % соответственно), Li_2O и Rb_2O . В отличие от темных слюд I фазы, циннвальдиты Малого штока резко обеднены хлором, содержание которого не превышает пределов чувствительности методом рентгеноспектрального микроанализа (фиг. 6).

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГРАНИТОИДОВ

Состав гранитов и гранит-порфиров штока Забытого характеризуется высоким содержанием кремнезема (76–78 мас. % SiO_2) (фиг. 7а). Они относятся к высокоглиноземистым железистым породам умеренно-щелочной серии с преобладанием К над Na ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.02\text{--}1.49$). Для них характерны повышенные (для пород с такими высокими содержаниями кремнезема) концентрации титана (0.04–0.07 мас. % TiO_2) и пониженные – кальция и фосфора (Приложение 1). Породы обогащены редкими щелочами, щелочноземельными элементами (Li, Rb, Cs и Be) и фтором (до 0.28 мас. %), но обеднены Sr и Ba. Они обогащены высокозарядными элементами (Y, Nb, Ta, Th и U), тогда как Zr и Hf находятся на близкларковом уровне (Приложение 1).

Суммарные содержания РЗЭ в породах штока составляют 150–180 г/т, спектры их распределения имеют слабый отрицательный наклон ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 1\text{--}2$) и глубокий европиевый минимум ($\Delta\text{Eu} = 0.01\text{--}0.05$) (фиг. 8).

Породы Тигринового штока отвечают гранитам умеренно-щелочной серии (фиг. 7а). Их общей особенностью является повышенная глиноземистость (фиг. 7б), высокая (>90%) железистость (фиг. 7г), низкие содержания фемических элементов, кальция и фосфора (приложение 1). Так же, как гранитоиды Забытого штока, они обогащены SiO_2 (71–77 мас. %). Однако, в отличие от Забытого, граниты Тигринового обладают существенно более высокими содержаниями фтора, редких щелочей (Li, Rb и Cs) и редких металлов (Ta, Nb, Be) (Приложение 1).

Содержания кремния и других петрогенных компонентов близки в породах I и II фаз Тигринового. В породах III фазы содержание SiO_2 несколько снижается (фиг. 7а). Для пород ранних

фаз характерен калиевый характер щелочности, который меняется на натровый в III фазе. Но тем не менее, точки составов всех пород располагаются в высококалиевой области (фиг. 7в).

По редким и рассеянным элементам породы I и II фаз также близки. Но риолит-порфиры I фазы наиболее обеднены фтором, редкими щелочами и высокозарядными Ta, Hf, U и Ga (Приложение 1). Одновременно эти породы обладают максимальными содержаниями щелочноземельных (Sr, Ba) и сидерофильных элементов (Sc, V, Cr, Co). Концентрации этих элементов снижаются в породах II и III фаз на фоне возрастающих концентраций фтора, редких щелочей и высокозарядных элементов (Ta, Nb, Hf и Ga).

Граниты третьей фазы по уровню накопления F и редких щелочей занимают промежуточное положение между породами первой и второй фаз. Одновременно они характеризуются минимальными среди пород ассоциации содержаниями Sr, Ba, Zr, Th и U и максимальными – Ta, Nb, Hf и Ga (Приложение 1).

Концентрации РЗЭ в породах двух ранних фаз близки и варьируют в пределах 150–205 г/т. Нормированные на хондрит спектры их распределения в породах I фазы квазисимметричны со слабым положительным уклоном и глубоким европиевым минимумом ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 0.8\text{--}0.9$, $\Delta\text{Eu} = 0.2\text{--}0.3$) (фиг. 8). Для пород II фазы спектры менее симметричны, а европиевый минимум становится глубже ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 0.6\text{--}0.8$, $\Delta\text{Eu} \leq 0.01$) (фиг. 8).

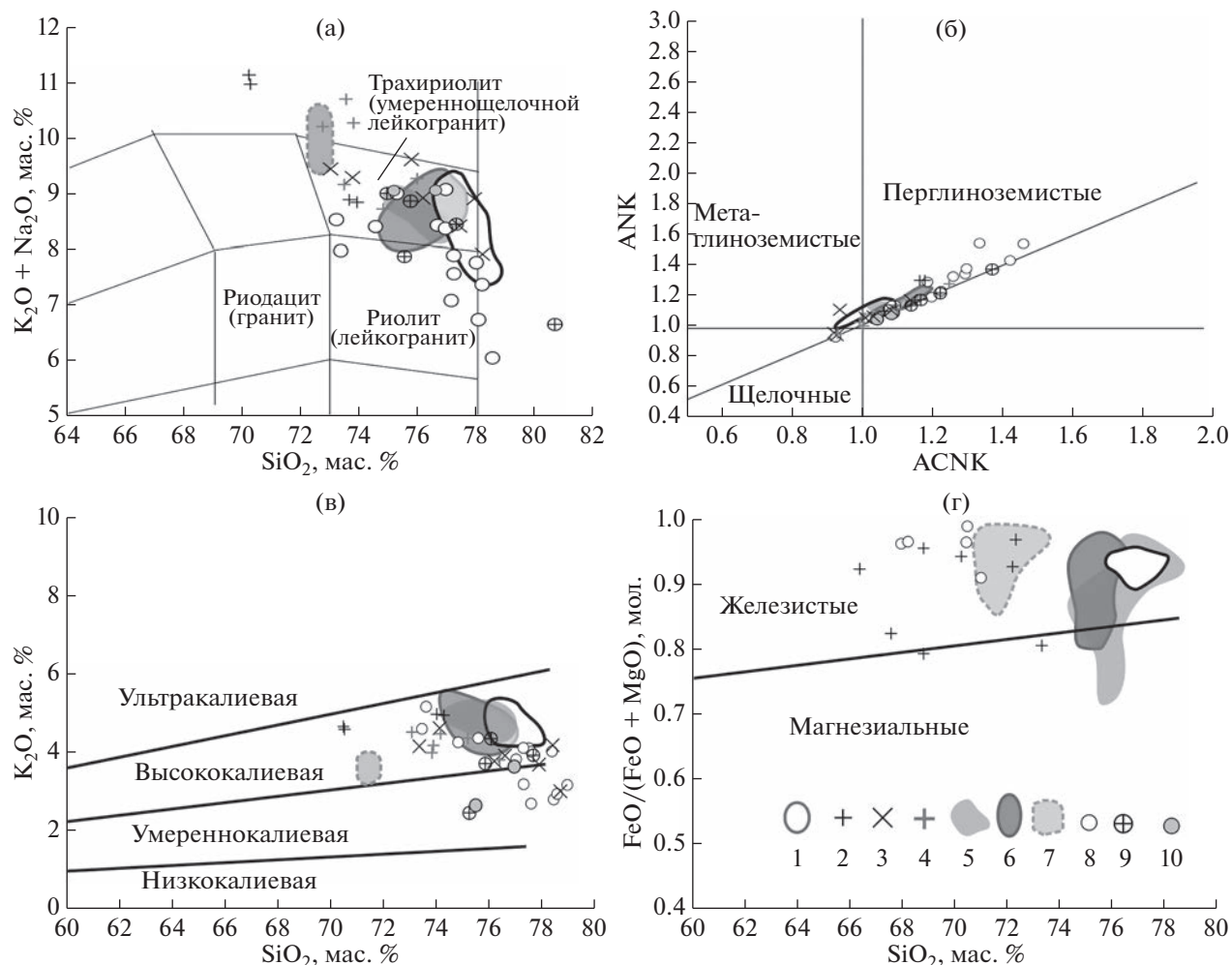
Содержания РЗЭ и Y в породах III фазы резко понижены в сравнении с остальными породами массива ($\Sigma\text{РЗЭ} = 30\text{--}33$ г/т, $\text{Y} < 8$ г/т). Спектры распределения РЗЭ обладают слабым отрицательным уклоном ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 1.2\text{--}1.3$). Европиевый минимум очень глубокий, но проявлен чуть слабее, чем в породах II фазы ($\Delta\text{Eu} = 0.01\text{--}0.02$) (фиг. 8). В отличие от гранитоидов ранних фаз, в их спектрах распределения РЗЭ наблюдается отчетливый тетрад-эффект (фиг. 8, Приложение 1).

РАСПЛАВНЫЕ И ФЛЮИДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В КВАРЦЕ ГРАНИТОИДОВ

Описание включений минералообразующих сред

Вкрапленники кварца в гранитоидах месторождений Тигриное и Забытое содержат многочисленные флюидные (ФВ) и расплавные (РВ) включения.

РВ расположены как по одному, так и группами по несколько штук. При комнатной температуре они раскристаллизованы, в них зачастую различимы отдельные кристаллические фазы и округлые или зажатые между дочерними кристаллами флюидное обособление. Часто вокруг РВ присутствует ореол мелких флюидных включений, образовавшихся при декрепитации. Размер



Фиг. 7. Петрохимические диаграммы для пород и составов стекол расплавных включений штоков Забытый и Тигриный: а – TAS-диаграмма. Границы полей приведены в соответствии с (Le Maitre, 1989); б – диаграмма “ $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ ” (молекулярные количества (Maniар, Piccoli, 1989); в – диаграмма “ $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ ”. Границы полей приведены в соответствии с (Rickwood, 1989); г – диаграмма “ $\text{SiO}_2 - \text{FeO}_{\text{tot}}/(\text{FeO}_{\text{tot}} + \text{MgO})$ ” (Frost et al., 2001). Условные обозначения: 1–4 – шток Забытый: 1 – гранит, 2 – РВ в кварце гранита, 3 – РВ в кварце гранит-порфира контактовой части, 4 – РВ в кварце гранит-порфира; 5–10 – шток Тигриный: 5 – I фаза, 6 – II фаза, 7 – III фаза, 8 – РВ в кварце I фазы, 9 – II фазы, 10 – III фазы.

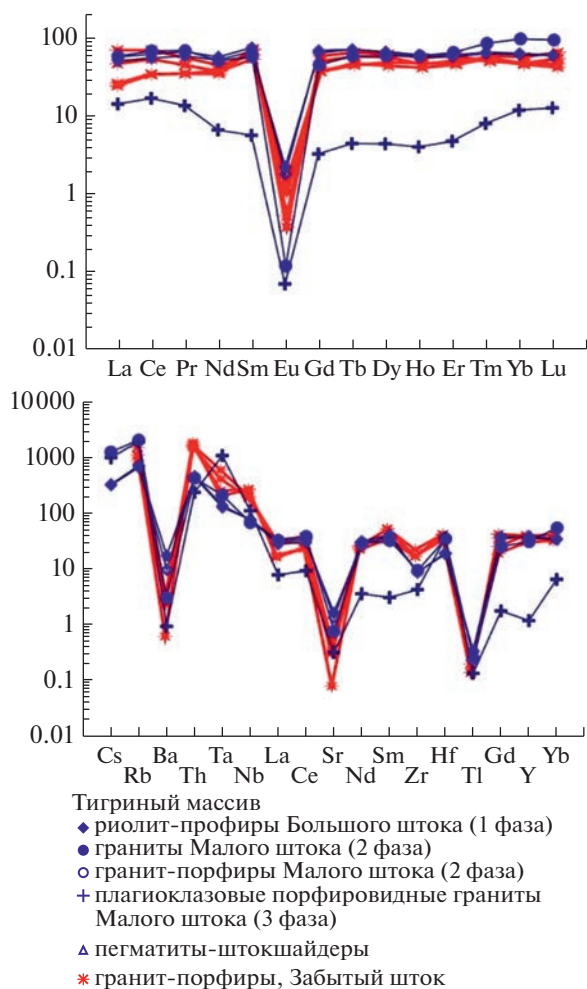
расплавных включений в пределах одного образца варьирует от 2–5 до 20–50 мкм.

Подавляющее большинство флюидных включений в кварце гранитоидов как Тигриного, так и Забытого, являются вторичными или мнимо-вторичными. Однако при тщательном изучении в каждой из фаз гранитов выделены первично магматические ФВ, близко расположенные и сингенетичные с РВ, комбинированные с магматическими кристаллическими включениями или находящиеся в одной зоне роста с ними. При комнатной температуре первичные флюидные включения в кварце гранитоидов двухфазовые газо-жидкие.

В гранитах штока Забытого среди множества ФВ обнаружены редкие ФВ, которые по близко-

му расположению с РВ можно считать сингенетичными (фиг. 9а). Флюорит заполняет трещины и интерстиции в мелкозернистой основной массе, являясь самым поздним минералом. Ассоциации включений во флюорите отличаются от таковых в кварце. В них доминируют флюидные включения. Исходя из соотношения объемов, занимаемых жидкой и газовой фазами во включениях, видно, что флюид, из которого кристаллизовался флюорит, был менее плотным, чем тот, из которого кристаллизовался кварц.

В гранитах I фазы Тигриного есть два типа вкрапленников с первичными ФВ, сингенетичными с РВ. В первом типе ФВ единичные, редкие, и встречаются чаще всего в ассоциации с кристаллическими включениями биотита (фиг. 9б). Вкрап-



Фиг. 8. Распределение редких и редкоземельных элементов в породах штоков Тигриный и Забытый. Содержания редких и редкоземельных элементов нормированы по составу хондрита (Boynnton, 1983) (a) и по составу примитивной мантии (Taylor, McLennan, 1985) (б).

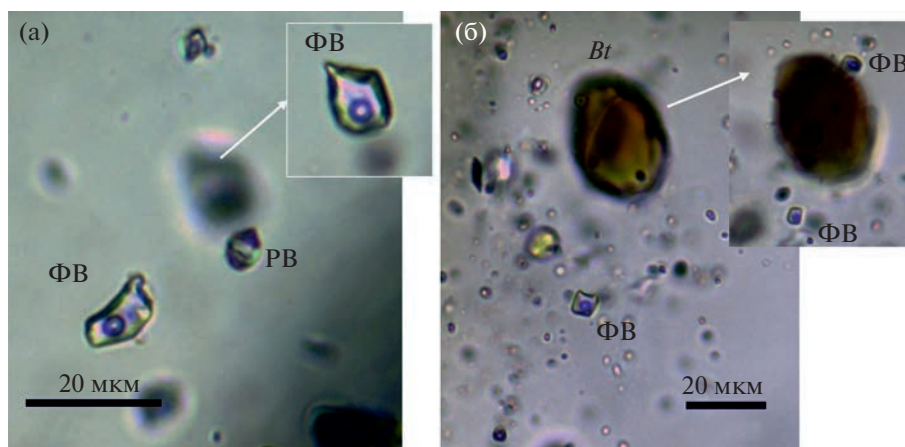
ленники второго типа равномерно заполнены флюидными включениями с единичными РВ среди них. Среди множества ФВ можно выделить единичные первичные крупные ФВ, сингенетичные с расплавленными. В таких ФВ объемное соотношение газовой и жидкой фаз примерно одинаково. В кварце гранитов II фазы первично магматические ФВ редки, они встречаются в ассоциациях с РВ или кристаллическими включениями биотита (циннвальдита). В мелких зернах кварца в основной массе встречаются отдельные РВ и ФВ. Многочисленные ФВ вместе с РВ и крупными включениями альбита встречаются в ядерных частях вкрапленников кварца гранитов Тигриного III фазы. При этом в средней и внешней зонах, где присутствуют редкие (средняя) и мелкие (внешняя) включения альбита, не содержатся включения минералообразующих сред. Наряду с зональными, есть и вкрапленники с равномерно расположенными включениями альбита, среди них также обнаружены ФВ, сингенетичные с расплавленными.

Таким образом, флюидная фаза в той или иной степени присутствовала в процессе магматической кристаллизации гранитоидов Тигриного и Забытого.

Состав, солёность и плотность флюидных включений

Для определения свойств магматической флюидной фазы были выбраны флюидные включения, отражающие магматический этап кристаллизации, и флюидные обособления в РВ.

Методом рамановской спектроскопии установлено, что в кварце гранитов I и II фазы Тигриного в газовой фазе ФВ и флюидных обособлений РВ значительную долю составляет метан, сов-



Фиг. 9. Первично магматические включения в кварце (a) гранит-порфира штока Забытый, (б) гранит-порфира I фазы Тигриного. РВ — расплавленное включение, ФВ — флюидное включение, Bt — кристаллическое включение биотита. На врезке показаны включения, нерезкие на основном изображении.

местно с ним в большинстве случаев присутствует углекислота. В кварце гранитов III фазы Тигриного массива в большинстве ФВ в РВ обнаружены следы CO_2 и CH_4 (рамановские линии низкой интенсивности).

В штоке Забытом первичные ФВ в кварце гранит-порфиров содержат малоплотную CO_2 , совместно с ней изредка диагностируется CH_4 . Во ФВ и в газовых обособлениях в РВ в кварце гранита CO_2 , CH_4 и N_2 обнаружены не были. Во флюорите из основной массы гранит-порфиров штока Забытого в первичных ФВ в газовой фазе диагностируется только малоплотная CO_2 . Сравнение состава газов во включениях магматических флюидов Тигриного и Забытого показывает, что ФВ гранитов Тигриного содержат значительные количества метана, углекислота встречается в подчиненных количествах. Во ФВ Забытого вторым после воды значимым летучим компонентом является углекислота, а метан обнаруживается спорадически.

Термометрические исследования показали, что водные растворы первичных ФВ в кварце гранитов обоих месторождений, вероятнее всего, имеют хлоридный состав, о чем свидетельствуют температуры начала плавления замороженных растворов $-21\ldots-23^\circ\text{C}$ для ФВ Забытого и $-23\ldots-26^\circ\text{C}$ для ФВ Тигриного. Последняя плавящаяся фаза ФВ в обоих случаях лед, и по температурам его плавления соленость растворов оценивается в 5–7 мас. % NaCl экв, при этом соленость растворов включений Забытого чуть выше, чем у Тигриного. Подавляющее большинство ФВ Забытого гомогенизируются в жидкость при $200\text{--}250^\circ\text{C}$, ФВ Тигриного – также в жидкость, но при более высоких температурах $250\text{--}350^\circ\text{C}$. Плотность флюидов в момент захвата составляла $0.65\text{--}0.85\text{ г/см}^3$.

Прогрев и термометрия расплавных включений

При прогреве в автоклаве и последующей закалке мелкие гомогенные РВ размером до 5–10 мкм в кварце всех фаз гранитов Тигриного обнаруживаются при 550°C (ниже 550°C прогревы не проводились). Температуры гомогенизации РВ в кварце гранит-порфиров Забытого составляют $525\text{--}550^\circ\text{C}$.

Графическим методом по пересечению изохор ФВ с изотермой гомогенизации РВ получено давление 3–4 кбар.

Для получения более крупных стекол, пригодных для анализа, образцы с РВ прогревались при температуре $650\text{--}700^\circ\text{C}$, превышающей температуру гомогенизации. После закалки при этих температурах включения состояли либо из гомогенного стекла, либо из стекла с остаточными флюидными пузырьками.

Состав расплавных включений

Стекла проанализированных РВ в обоих случаях отвечают кислым высокоглиноземистым расплавам нормальной–умеренной щелочности, с преобладанием Na над K (табл. 1). Средние значения суммы щелочей РВ Забытого в среднем выше (8–11 мас. %), чем Тигриного (6–9.5 мас. %). Составы стекол РВ группируются вблизи валовых составов пород, но варьируют в более широком диапазоне составов. Расплавы Забытого в среднем обогащены по сравнению с расплавами Тигриного FeO. В расплавах Тигриного содержание FeO максимально в РВ I фазы и последовательно снижается во II и III фазах.

РВ в кварце гранитоидов Забытого и Тигриного массивов отличаются повышенными содержаниями редких щелочей и фтора. Расплавы обоих массивов обогащены рубидием, содержание которого в расплавах III фазы Тигриного достигает 0.3 мас. %, а в расплавах Забытого – 0.25 мас. %. Расплавы I и II фаз Тигриного обеднены Rb_2O по сравнению с Забытым. Содержание Cs_2O максимально в РВ Забытого и III фазы Тигриного 0.05–0.1 мас. %. Таким образом, расплавы обоих массивов содержат концентрации редких щелочей, типичные для редкометалльных гранитоидов.

РВ в кварце Тигриного массива обогащены фтором по сравнению с РВ Забытого. Максимальные значения концентраций этого элемента в расплавах Тигриного составляют 1.4, 1.6 и 2.2 для I, II и III фаз соответственно. Однако для РВ всех трех фаз характерны значительные вариации содержаний фтора с минимальными концентрациями около 0.4 мас. % для РВ в кварце гранитоидов I фазы. В одном из включений с низким содержанием фтора был обнаружен недоплавленный кристалл флюорита, что подтверждает крайне высокую фтористость расплавов.

Максимальные содержания фтора в РВ Забытого не превышают 1 мас. %, а минимальные составляют около 0.2 мас. %. Следует заметить, что РВ I фазы Тигриного близки по содержаниям фтора и редких щелочей к РВ в кварце Забытого, в то время как составы РВ в кварце гранитоидов II и III фаз существенно отличаются обогащением этими элементами.

Расплавы, из которых кристаллизовался кварц I фазы Тигриного и кварц Забытого содержат значимые содержания хлора. Однако его содержания в основном не превышают 0.1 мас. % в стеклах РВ Тигриного (I фаза) и 0.15 мас. % в РВ Забытого. Высокофтористые редкометалльные расплавы II и III фаз Тигриного обеднены хлором настолько, что в подавляющем большинстве включений его содержания не превышают пределов обнаружения этого элемента (фиг. 10).

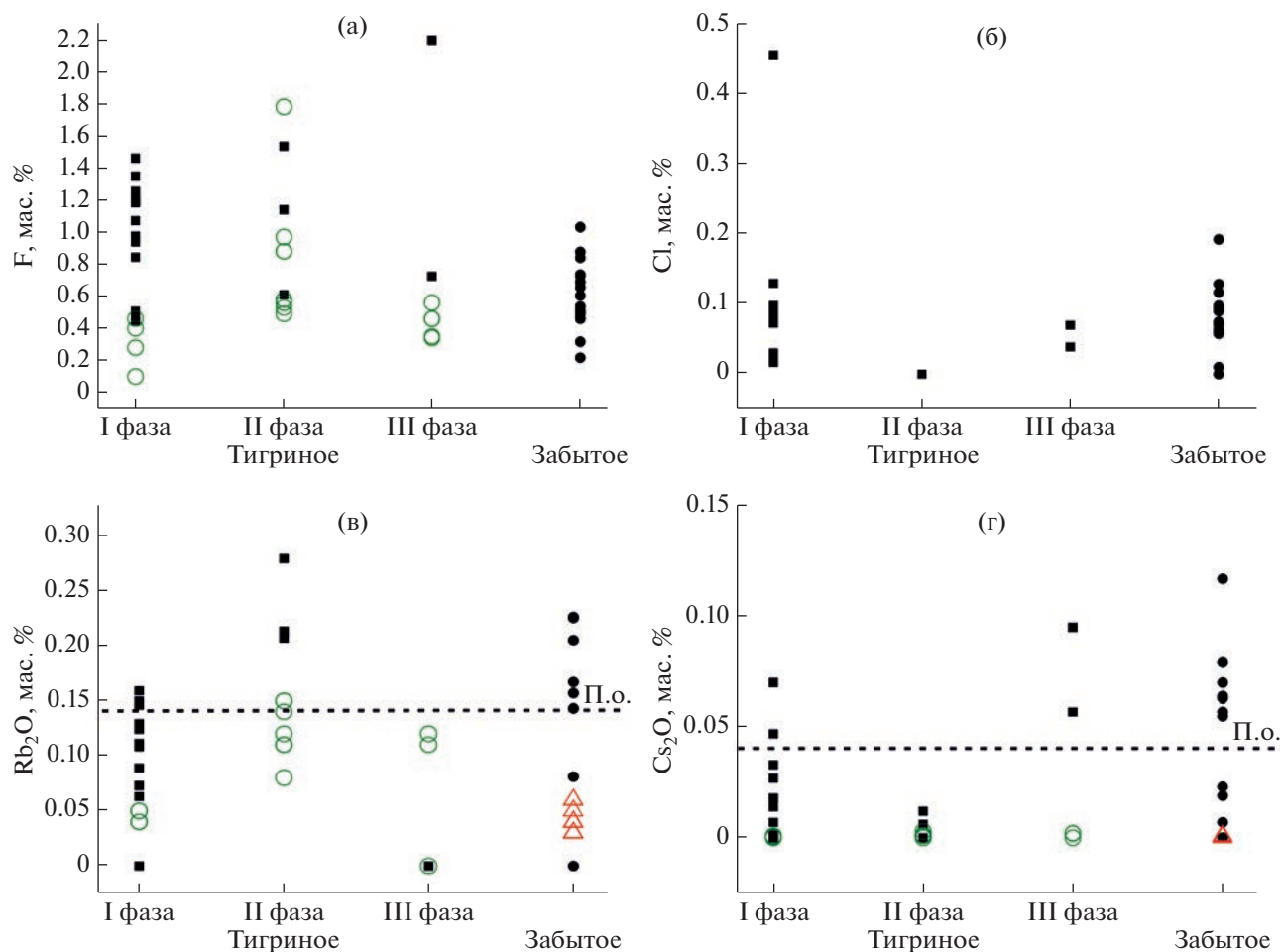
Стекла РВ после прогрева в автоклаве содержат растворенную воду. Для включений, кото-

Таблица 1. Представительные анализы стекол расплавных включений в кварце гранитоидов Тигриного и Забытого

Шток Забытый	Граниты, обр. АГ-496			Риолиты, обр. АГ-192					Порфировидный гранит, штольня 3, гор. 350м. обр. 8-20-12			
	1	2	3	1	2	3	4	5	1	2	3	4
№ анализа												
Фазовый состав	Ст. + кр.	Ст. + кр.	Ст.	Ст. + г.п.	Ст.	Ст.	Ст. + г.п.	Ст.	Ст. + кр.	Ст. + кр.	Ст.	Ст. + г.п.
Т°С прогрева	660°С	660°С	660°С	700°С	700°С	700°С	700°С	700°С	650°С	650°С	650°С	650°С
SiO ₂	67.11	67.41	65.01	67.59	72.18	73.29	70.65	72.31	70.828	70.83	66.40	70.25
TiO ₂	Н.д.	Н.д.	Н.д.	0.11	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.
Al ₂ O ₃	14.23	14.10	16.19	11.60	11.67	11.14	11.53	12.60	14.123	14.12	14.60	13.88
FeO	0.63	0.53	0.18	0.34	0.17	0.22	0.43	0.42	0.184	0.18	0.20	0.67
MnO	Н.п.о.	Н.п.о.	0.25	0.07	0.09	Н.п.о.	0.08	Н.п.о.	0.139	0.14	0.13	0.07
CaO	0.66	0.73	0.28	0.11	0.13	0.27	0.20	0.31	0.198	0.20	0.10	0.02
Na ₂ O	3.69	3.65	6.17	5.31	4.63	4.54	4.41	4.86	6.43	6.43	5.30	5.65
K ₂ O	4.49	4.47	4.28	3.33	2.75	3.89	3.33	3.68	3.98	3.98	4.08	4.22
Rb ₂ O	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	0.23	0.23	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.
Cs ₂ O	Н.д.	Н.д.	Н.д.	0.08	0.06	Н.п.о.	Н.п.о.	0.06	Н.п.о.	Н.п.о.	0.12	Н.п.о.
Cl	Н.п.о.	Н.п.о.	0.09	0.12	0.07	0.06	0.19	0.13	0.075	0.08	0.09	0.07
F	0.84	0.51	0.69	0.49	1.03	0.54	0.73	0.66	0.533	0.53	0.32	0.50
H ₂ O*	7.19	7.27	3.74	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.
Сумма-F	90.81	90.89	92.36	88.86	91.88	93.63	90.85	94.54	95.99	91.01	94.87	91.66
A/CNK	1.2	1.2	1.1	0.9	1.1	0.9	1.0	1.0	0.9	1.1	1.0	1.2
ANK	1.3	1.3	1.1	0.9	1.1	1.0	1.1	1.1	0.9	1.1	1.0	1.3

Массив Тириный	1 фаза, гранит, образец 5-тиг-1						2 фаза, обр. тиг-4		2 фаза, керн, обр. А-367		3 фаза, керн, обр. тт-3-1	
	1	2	3	4	5	6	1	2	1	2	1	2
№ анализа												
Фазовый состав	650	650	650	650	650	700	700	700	600	600	650	650
$T^{\circ}\text{C}$ прогрева	Ст. + кр.	Ст. + кр.	Ст. + кр.	Ст. + кр.	Ст.		Ст.	Ст. + г.п.	Ст.	Ст.	Ст. + кр.	Ст.
SiO ₂	70.43	68.74	71.01	70.48	70.42	66.90	69.36	71.33	68.53	69.57	72.40	69.90
TiO ₂	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	0.06	Н.п.о.	0.07	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.
Al ₂ O ₃	13.13	14.23	12.51	12.68	13.37	14.75	14.20	14.33	13.51	12.13	12.84	13.85
FeO	0.41	0.46	0.40	0.40	0.38	0.96	0.04	0.04	Н.д.	0.21	0.06	0.05
MnO	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	0.06	0.08	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.
CaO	0.29	0.34	0.26	0.22	0.33	0.41	0.05	0.02	Н.п.о.	Н.п.о.	0.04	Н.п.о.
Na ₂ O	2.74	3.97	4.40	3.36	4.51	3.77	4.06	6.50	4.19	4.21	5.24	6.19
K ₂ O	3.71	3.88	3.50	3.63	4.03	4.15	3.38	2.32	3.89	3.49	3.40	2.45
Rb ₂ O	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	0.28	0.21	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.
Cs ₂ O	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	0.06
Cl	0.08	0.08	0.07	0.10	0.09	0.13	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	0.04	0.07
F	1.46	1.20	1.07	1.26	1.18	1.35	2.67	2.60	0.61	1.14	0.72	2.20
H ₂ O*	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	8.85	7.05	Н.д.	Н.д.
Сумма-F	90.92	91.89	92.23	90.86	93.21	91.09	91.47	94.83	90.12	89.60	94.13	92.63
ACNK	1.5	1.3	1.1	1.3	1.1	1.3	1.4	1.1	1.2	1.1	1.0	1.1
ANK	1.5	1.3	1.1	1.3	1.1	1.4	1.4	1.1	1.2	1.1	1.0	1.1

Примечание. Фазовый состав расплавов включений: ст. – стекло, г.п. – газовый пузырек, кр. – кристалл. H₂O* – содержание воды оценено по содержанию избыточного кислорода (см. методику). Н.д. – нет данных. н.п.о. – ниже предела обнаружения. Содержания MgO и P₂O₅ ниже предела обнаружения во всех анализах.



Фиг. 10. Содержание редких и летучих элементов в породах и стеклах РВ. Условные обозначения: черные залитые точки — РВ, пустые знаки — породы. п.о. — предел обнаружения.

рые сохранили герметичность в ходе прогрева, недостаток суммы микрозондового анализа, который позволяет оценить содержание воды, составляет 5–11 мас. % и может достигать в редких случаях 13 мас. %. В тех случаях, когда содержание воды можно было оценить по избыточному кислороду, величины ее концентраций составили 7–9 мас. %.

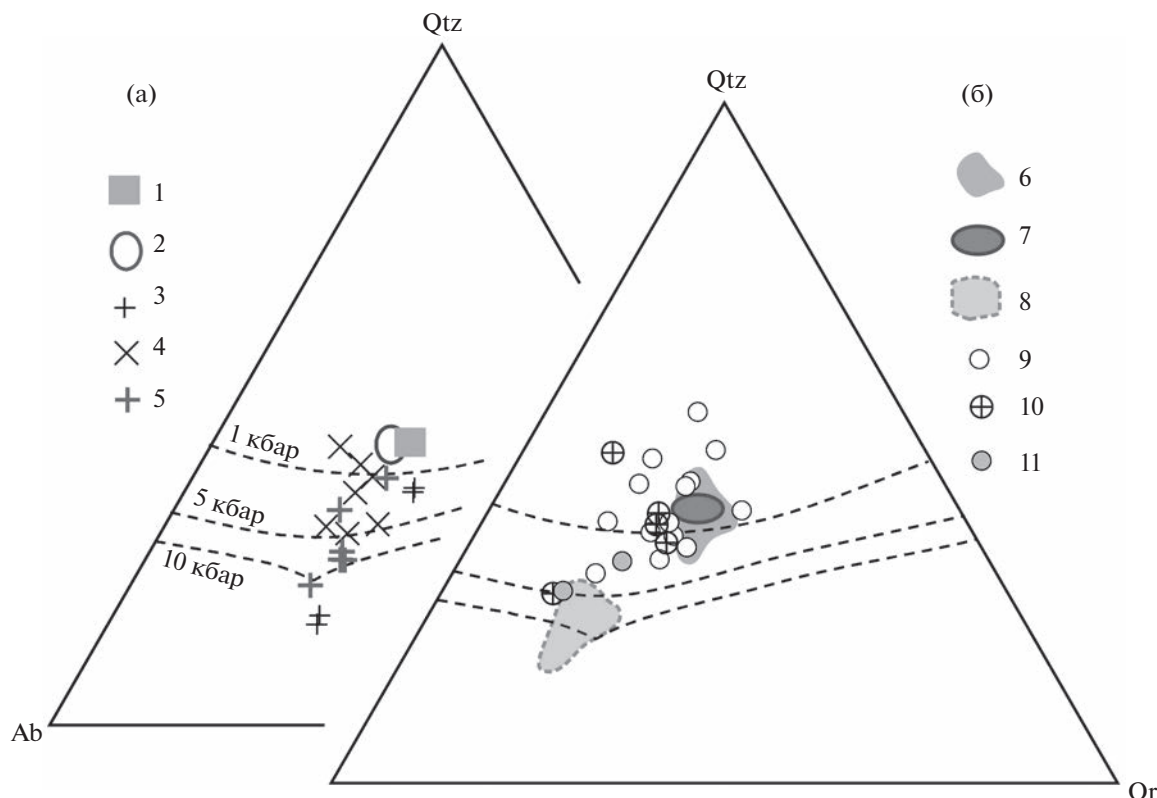
На диаграмме, построенной по соотношениям нормативных альбита, ортоклаза и кварца, которая часто используется для изображения составов редкометалльных гранитов (фиг. 11), составы стекол РВ в кварце гранитов Тигриного образуют поля, близкие к составам пород соответствующих фаз. Это означает, что кварц является ранней фазой. Точки составов расплавов I и II фаз группируются вблизи минимума гаплогранитной котектики при давлении 1 кбар. При этом большая часть точек находится в поле кристаллизации кварца. В целом, как составы пород, так и составы расплавов располагаются в соответствии с альбитовым трен-

дом эволюции водонасыщенных и высокофтористых гранитных магм по (Коваленко, 1977).

Составы РВ в кварце Забытого выстраиваются вдоль минимумов котектик с последовательно возрастающим давлением от 1 до 10 кбар и таким образом также следуют альбитовому тренду. Точки составов РВ в кварце краевых фаций массива ложатся ближе к минимумам при более низких давлениях, в то время как РВ в порфировидных гранитах по составу ближе к котектикам при более высоких давлениях.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Генезис редкометалльных гранитов до сих пор вызывает дискуссии, связанные с природой высоких содержаний в них несовместимых элементов. Это обусловлено, главным образом, тем, что эти граниты, а в особенности их Li–F тип, образуются из насыщенных летучими и флюсующими компонентами магм. Высокие, часто на уровне насыщения, содержания в них H_2O , F и щелоч-



Фиг. 11. Состав пород и эволюция составов расплавов Забытого (а) и Тигрино (б) в пересчете на нормативные кварцы (Qtz), альбит (Ab) и ортоклаз (Or). Условные обозначения. Забытый: 1 – граниты, 2 – гранит-порфиры контактовой части, 3 – ПВ в кварце гранитов, 4 – ПВ в кварце гранит-порфиров контактовой части, 5 – ПВ в кварце гранит-порфиров; Тигриний: 6 – I фаза, 7 – II фаза, 8 – III фаза, 9 – ПВ в кварце I фазы, 10 – II фазы, 11 – III фазы. Положение изобар при повышенном давлении H_2O от 1 до 10 кбар по (Huang, Wyllie, 1975; Коваленко, 1977).

ных металлов приводят к резкому понижению температуры солидуса и удлинению процесса кристаллизационной дифференциации. Здесь возникает возможность накопления несовместимых элементов, среди которых главную роль играют редкие щелочные (Li, Rb, Cs), щелочно-земельные (Be), высоко-зарядные (Sn, W, Mo, Ta, Nb) литофильные элементы, которые носят обобщенное название “редкие металлы”. Их уровни концентраций в наиболее поздних дифференциатах достигают величин, которые сопоставимы с промышленными рудами этих металлов (Таусон, 1977; Коваленко и др., 1999; Руб, 1997; Попов и др., 1998; Петрография ..., 2001).

Однако не только процесс магматической дифференциации может привести к экстремальному накоплению редких металлов. Высокое содержание воды, фтора и хлора способствует комплексообразованию и переходу этих металлов в фазу водного флюида, которая играет активную роль в эволюции низкотемпературных флюидонасыщенных дифференциатов гранитных магм (Наумов и др., 1982; Рейф, 1990; Thomas et al., 1996; Thomas et al., 2000; Бычков, Матвеева, 2008; Lehman, 2021). В связи с этим одна из концепций предусматривает ведущую роль флюидно-магма-

тического взаимодействия, и даже постмагматического флюидного автометаморфизма в образовании гранитов с высокими концентрациями редких металлов (Коваль, 1998; Таусон, 1977; Антипин и др., 2002; Козлов, 2011, 2013).

Таким образом, проблема роли силикатных магм в концентрировании редких металлов остается нерешенной. Сопоставление процессов эволюции Забытого и Тигрино гранитных массивов, сопряженных с разномасштабной редкометалльной минерализацией, дает существенный вклад в понимание этого вопроса.

Такое сопоставление уже предпринималось в работе (Руб, Руб, 2006). Авторы отметили различную степень дифференцированности магм Забытого и Тигрино массивов и магматическую природу редкометалльных гранитов этих месторождений. Ими также был сделан вывод о гетерогенном состоянии магм и участии водных флюидов в процессе магматической кристаллизации. Однако температуры магматической кристаллизации, определенные методом гомогенизации, существенно превышают полученные нами в данном исследовании. Кроме этого, авторы рассуждают о составе расплавов, оперируя косвенными данными, в то время как в данной работе при-

водятся результаты непосредственного измерения состава закаленных расплавных включений. Более подробные данные о составах расплавов, формировавших гранитоиды Тигриного массива, приведены в работе (Смирнов и др., 2014), где подтверждены предположения, сделанные в (Руб, Руб, 2006) относительно состава исходных расплавов, высокое содержание воды и фтора, а также присутствие флюидной фазы в ходе магматической кристаллизации. Недавно, опираясь на особенности геохимии пород Тигриного массива (Крук и др., 2022), был сделан вывод о длительной магматической истории, включавшей в себя эпизод интенсивной дегазации магмы во время становления пород III фазы внедрения Тигриного массива.

Еще в (Руб, Руб, 2006) было отмечено, что гранитоиды Тигриного и Забытого массивов обладают общими чертами и последние можно считать менее дифференцированными аналогами первых. Это подтверждается нашими исследованиями, но следует добавить, что эти два массива отличались самой историей магматического этапа развития их РМС.

Оба массива возникли в результате эволюции и внедрения высококремнистых относительно высокоглиноземистых кислых магм нормальной щелочности, обогащенных водой, фтором и редкими металлами. Для сформировавшихся пород характерен существенно калиевый профиль щелочности. Однако, как было показано в (Смирнов и др., 2014), обогащение калием может быть связано не столько с составом силикатного расплава, сколько с флюидно-магматическим взаимодействием. Повышенные содержания фтора и редких металлов позволяет отнести породы обоих массивов к Li–F типу редкометалльных гранитов.

Особенности составов слюд, являющихся прекрасными индикаторами геохимических особенностей процессов магматической кристаллизации, показывают, что в ходе эволюции обоих массивов происходили достаточно резкие изменения условий. Составы слюд из гранитоидов Забытого относятся к аннитам и сидерофиллитам, обогащенным литием и фтором. Они разбиваются на две группы: сидерофиллитов и аннитов, которые характерны для разных пород штока. Анализ закономерностей изменения их состава позволяет полагать, что все породы образовались из единого источника, но слюды гранит-порфиров, отобранных из штольни 2, наиболее обогащены фтором, литием и рубидием. Это может означать, что они отвечают более высокой степени дифференциации исходной магмы, чем порфировидные граниты и гранит-порфиры штолен 3 и 4. Очевидный разрыв между отдельными группами, видимый на фиг. 5, может быть подтверждением, что породы с разными слюдами отвечают именно разным фазам внедрения, а не разным фаціальным разновидностям.

Слюды риолит-порфиров I фазы Тигриного интрузива похожи по составу на слюды Забытого,

но отличаются чуть более высокой фтористостью и редкометалльностью.

Слюды II и III фаз (Малый шток) резко отличаются от слюд I фазы и не имеют ничего общего со слюдами гранитов Забытого. Это слюды ряда циннвальдит–полилитионит, типичные для редкометалльных литий-фтористых гранитов. Важной особенностью, отличающей слюды Малого штока от слюд Большого штока, является резкое обеднение хлором. Очевидно, что ни по главным компонентам (фиг. 5), ни по содержаниям фтора и хлора составы слюд Малого штока не являются продолжением эволюционного ряда слюд Большого штока. Слюды гранитоидов II и III фаз также имеют существенные различия. Слюды из гранитов III фазы не образуют единого эволюционного тренда со слюдами из гранитов II фазы. Они отличаются несколько пониженными содержаниями Al_2O_3 и обеднены TiO_2 и MgO . Если слюды риолит-порфиров I фазы и гранитов II фазы могут рассматриваться как части одного эволюционного ряда, то составы слюд гранитов III фазы лежат вне этого ряда.

Анализ составов слюд показывает, что магмы массивов Тигриного и Забытого на ранних стадиях становления имели много общего. Относясь к редкометалльным магмам Li–F типа, они были обогащены хлором и фемическими компонентами. Образование Малого штока Тигриного месторождения, по-видимому, имеет значительные отличия как по условиям, так и по составу магм, что и зафиксировано в резком различии состава слюд. Тем не менее, магмы I и II фаз, судя по составам слюд, являлись продуктом единого процесса дифференциации, вероятнее всего, включавшего фракционирование остаточного расплава еще до начала кристаллизации слюд. Этим объясняется разрыв в составах слюд гранитоидов I и II фаз, лежащих на одной линии тренда. Такой вывод хорошо согласуется с таким же заключением, сделанным в (Крук и др., 2022) на основании петро-геохимических данных.

Вероятнее всего, состав расплавов, из которых кристаллизовались слюды гранитоидов III фазы, был близок к составу расплавов II фазы и также относился к редкометалльному Li–F типу, но был резко обеднен фемическими компонентами, благодаря процессу, который не затронул магмы I и II фаз и, возможно, был связан с дегазацией, отмеченной в (Крук и др., 2022), которая вполне могла бы объяснить вынос фемических компонентов.

Особенности эволюции составов слюд хорошо согласуются с полученными в данном исследовании результатами изучения химизма минералообразующих сред. Анализ состава прогретых РВ показывает, что магматические расплавы обоих массивов были высококремнистыми, обогащенными водой и фтором. Составы стекол РВ в кварце в целом близки к валовым составам соответствующих пород, что подтверждает раннюю кристалли-

зацию кварца и согласуется с петрографическими наблюдениями. Однако составы РВ отличаются от состава пород преобладанием натрия над калием. Так же, как и составы пород, составы РВ следуют альбитовому тренду эволюции. Все это хорошо согласуется с выводом (Руб, Руб, 2006) о магматической природе редкометалльных гранитов обоих массивов.

Вода в расплавах обоих массивов является главным летучим компонентом. Ее высокие содержания в расплавах и наличие включений водных флюидов, сингенетичных с расплавленными, говорит о насыщенности магм водой. Для типичного риолитового состава содержания воды, оцененные в рамках данного исследования (7–11 мас. %), потребовали бы создать давление в пределах 2.8–4.3 кбар (Newman, Lowenstern, 2013). Однако эта модель не позволяет учесть особенности составов редкометалльных гранитных расплавов, в которых повышенная глиноземистость может способствовать увеличению растворимости воды (Behrens, Jantos, 2001). Таким образом, давление в очагах редкометалльно-гранитных магм обоих месторождений не превышало 3–4 кбар. Следование альбитовому тренду может отвечать росту флюидного давления в очаге и накоплению фтора по мере эволюции.

С магматическими расплавами сосуществовал достаточно высокоплотный ($0.65\text{--}0.85\text{ г/см}^3$) водный флюид. В отличие от предыдущих исследователей, мы не обнаружили большого разнообразия солевых составов, о чем говорит небольшой диапазон температур начала плавления замороженных включений ($-21\text{--}-26^\circ\text{C}$). Нами также не были обнаружены включения рассолов, которые описываются в (Руб, Руб, 2006) со ссылкой на работу (Хетчиков и др., 1991). Все исследованные нами сингенетичные с расплавленными ФВ содержат низкоконцентрированный солевой раствор с соленостью не более 7 мас. % NaCl эквивалента. Отсутствие явных признаков фазовой сепарации на магматическом этапе подтверждает сделанный выше вывод о высоком флюидном давлении.

Полученные данные говорят о крайне низких температурах магматической кристаллизации для обоих массивов. Эти температуры не превышали 550°C , что обусловлено очень высокими содержаниями воды и фтора в магме.

Несмотря на то, что общие черты эволюции магм обоих массивов очень близки, данные по составам расплавов свидетельствуют о значительных различиях.

Составы расплавов двух ранних фаз внедрения массива Тигриного близки к расплавам гранитоидов массива Забытого, что и предполагалось на основе анализа состава слюд. Эти расплавы отличаются повышенным содержанием хлора, пониженным относительно более поздних фаз Тигриного содержанием фтора. Таким образом, можно сделать вывод о том, что действительно составы магмы Забытого отвечают наименее дифферен-

цированным порциям магм Тигриного (Руб, Руб, 2006). Широкий разброс точек состава расплавов I и II фаз Тигриного и расположение точек выше низкобарической и низкофтористой гаплогранитной котектики (фиг. 11) может быть признаком открытости магматической системы и ее дегазации. Точки составов расплавов штока Забытого образуют более компактную группу вблизи низкобарической котектики и более четко выраженный тренд от гранит-порфиров к порфиroidным гранитам (фиг. 11), что позволяет предположить более герметичные условия эволюции магмы этого массива.

Совпадая с расплавами I фазы Тигриного и расплавами Забытого по главным пороодообразующим компонентам, расплавы II фазы Тигриного резко отличаются от них повышенным содержанием фтора и редких щелочных металлов и обеднением хлором. В этом отношении расплавы II фазы близки к расплавам III фазы Тигриного. В отличие от фтора, хлор проявляет тенденцию к перераспределению в фазу водного флюида при его отделении от расплава. Вероятно, именно масштабы дегазации и отличают развитие штока Забытого от Тигриного. Кристаллизационная дифференциация способствовала накоплению в остаточных расплавах фтора и редких металлов и тем самым сформировала геохимический облик магмы II фазы. Накопление воды способствовало росту давления и при благоприятных условиях привело к выделению водного флюида, сконцентрировавшего в себе хлор, фемические компоненты, а также ряд редких металлов (Li, Sn, W, Mo). Удаление этого флюида, тем не менее, не привело к полному истощению расплава по Ta, Nb, Li и фтору, и не препятствовало кристаллизации в подчиненном количестве циннвальдита, топаза и тантало-ниобатов.

Расплавы III фазы внедрения Тигриного массива обладают исключительно высокой фтористостью. Наши наблюдения показали, что даже при низких содержаниях фтора в расплаве, во включениях обнаруживаются недоплавленные кристаллы флюорита. Подобно расплавам II фазы, расплавы III фазы не содержат значительных концентраций хлора и обогащены редкими щелочными элементами. Однако обеднение валовых составов пород по редким элементам и фтору, наличие тетрад-эффекта в составах РЗЭ (Крук и др., 2022) говорит о более интенсивном, по сравнению с II фазой, флюидно-магматическом взаимодействии и удалении указанных элементов из расплава флюидной фазой в условиях открытой системы. Именно этим можно объяснить менее выраженную по сравнению с Забытым приуроченность составов расплавов II и III фазы Тигриного массива к альбитовому тренду.

Помимо резкого различия в режимах дегазации, магматогенные флюиды Забытого и Тигриного также имеют существенное различие в составах растворенных газов. Флюид Тигриного в большей степени обогащен CH_4 по сравнению с

Забытым. В отличие от Тигрино, флюиды Забытого демонстрируют присутствие небольшого количества метана только на самых поздних стадиях развития (неопубликованные данные авторов). Высокие содержания CH_4 , как предполагалось ранее, могут быть связаны с привнесением в магматический очаг флюидной фазы, выделяющейся при метаморфизме осадочных пород региона или отделяющейся при кристаллизации более глубоких, в том числе и мантийных магм (Смирнов и др., 2014). Таким образом, полученные нами данные согласуются с тем, что развитие РМС месторождения Тигриное было связано с взаимодействием расплавов эволюционирующего очага с трансмагматическими флюидами и последующим выносом вещества этими флюидами на уровень становления рудных грейзеновых залежей или жильных серий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в ходе данного исследования результаты показывают, что развитие РМС месторождений Забытого и Тигрино связаны с одинаковым типом магм, относящихся к редкометалльному Li–F типу. Эволюция очагов этих магм происходила в условиях насыщенности водной флюидной фазой, вероятно при высоком флюидном давлении. Начальные стадии эволюции связаны с магмами, расплавы которых были обеднены по сравнению с более поздними порциями редкими металлами и фтором и обогащены хлором и фемическими компонентами. Дальнейшая эволюция массива Забытого протекала в относительно герметичных условиях и привела к небольшому обогащению остаточных расплавов фтором и редкими элементами, что зафиксировано в составах слюд. В отличие от Забытого, эволюция очага массива Тигрино протекала в менее герметичных условиях. Расплавы II фазы в результате кристаллизационной дифференциации были обогащены фтором и редкими элементами, но испытали дегазацию с выносом хлора, вероятно части редких и фемических элементов. Наиболее высокой интенсивности процессы дегазации достигли во время формирования гранитов III фазы внедрения.

Различия в масштабах оруденения двух рассматриваемых РМС могли быть обусловлены различиями во флюидном режиме эволюции магматических очагов при более существенном участии в развитии Тигриной РМС потоков трансмагматических флюидов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории рентгеноспектральных методов анализа ИГМ СО РАН к. г.-м. н. Н.С. Карманову и В.Н. Королюку за всестороннюю помощь и проведение анализов водосодержащих стекол прогретых РВ. Для работы ав-

торами использованы образцы гранитоидов месторождения Забытого, предоставленные ранее д. г.-м. н. В.Г. Гоневчуком (ДВГИ ДВО РАН).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках реализации научного проекта № 20-05-00550, а также государственного задания ИГМ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антипин В.С., Холлс К., Митичкин М.А., Скотт П., Кузнецов А.Н. Эльваны Корнуолла и Южной Сибири – субвулканические аналоги субшочных редкометалльных гранитов // Геология и геофизика. 2002. Т. 43, № 9. С. 847–857.
- Бычков А. Ю., Матвеева С.С. Термодинамическая модель формирования рудных тел вольфрамитового жильно-грейзенового месторождения Акчатау // Геохимия. 2008. № 9. С. 934–954.
- Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России (ред. А.И. Ханчук). Кн. 1. Владивосток: Дальнаука, 2006. 572 с.
- Гоневчук В.Г., Коростелев П.Г., Семяняк Б.И. О генезисе оловянного месторождения Тигриное // Геология рудн. месторождений. 2005. № 3. С. 249–264.
- Коваленко В.И., Костицын Ю.А., Ярмолюк В.В., Будников С.В., Ковач В.П., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Антипин В.С. Источники магм и изотопная (Sr, Nd) эволюция редкометалльных Li–F гранитоидов // Петрология. 1999. Т. 7. № 4. С. 401–429.
- Коваленко В.И. Петрология и геохимия редкометалльных гранитоидов. Новосибирск: Наука, 1977. 205 с.
- Коваль В.П. Региональный геохимический анализ гранитоидов. М.: Издательство СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1998. 483 с.
- Козлов В.Д. Особенности редкоэлементного состава и генезиса гранитоидов шахтаминского и кукульбейского редкометалльного комплексов Агинской зоны Забайкалья // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 5. С. 676–689.
- Коростелев П.Г., Гоневчук В.Г., Гоневчук Г.А., Горбач Г.И., Залевская В.Н., Кокорин А.М., Кокорина Д.К., Левчук Л.С., Недашковский А.П. Минеральные ассоциации месторождений олова и вольфрама на Дальнем Востоке. Владивосток: ДВО АН СССР, 1990. С. 17–61.
- Котов А.А., Смирнов С.З., Плечов П.Ю., Персиков Э.С., Черткова Н.В., Максимович И.А., Карманов Н.С., Бухтияров П.Г. Методика определения содержания воды в природных расплавах риолитового состава методами спектроскопии комбинационного рассеяния и электронно-зондового микроанализа // Петрология. 2021. Т. 29. № 4. С. 429–448.
- Крук Н.Н., Гаврюшкина О.А., Федосеев Д.Г., Орехов А.А., Крук Е.А., Касаткин С.А., Медников С.Л. Редкометалльные граниты массива Тигринный (Сихотэ-Алинь): геохимия, минералогия и особенности эволюции // Тихоокеанская геология. 2022. Т. 41. № 1. С. 46–64.
- Крылова Т.Л., Pandian M.S., Бортников Н.С., Vijay Anand S., Гореликова Н.В., Гоневчук В.Г., Коростелев П.Г. Вольфрамовые и оловянно-вольфрамовые месторождения Дегана (Раджастан, Индия) и Тигриное (Приморье, Россия): состав минералообразующих флюидов и условия отложения вольфрамита // Геология рудн. месторождений. 2012. Т. 54. № 4. С. 329–349.

- Наумов В.Б., Коваленко В.И., Косухин О.Н. Параметры кристаллизации онгонитовых магм по данным изучения расплавных включений // Докл. АН СССР. 1982. Т. 267. № 2. С. 435–437.
- Петрография и петрология магматических, метаморфических и метасоматических горных пород. Под ред. В.С. Попова и О.А. Богатикова. М.: Логос, 2001. 768 с.
- Попов В.С. Новые магматические горные породы // Соросовский образовательный журн. 1998. № 6. С. 60–64.
- Рейф Ф.Г. Рудообразующий потенциал гранитов и условия его реализации. М.: Наука, 1990. 181 с.
- Руб А.К. Зональность редкометалльных гранитоидов, отраженная в эволюции состава акцессорных тантало-ниобатов и сопутствующих минералов // Минеральное сырье. 1997. № 1. С. 58–73.
- Руб А.К., Руб М.Г., Чистякова Н.И., Кривошеков Н.Н., Руб И.А. Минералого-геохимические особенности олово-вольфрамовой минерализации месторождения Тигриное (Центральный Сихотэ-Алинь) // Тихоокеанская геология. 1998. Т. 17. № 5. С. 78–88.
- Руб М.Г., Руб А.К., Кривошеков Н.Н., Ашихмина Н.А. Редкометалльные граниты и руды месторождения Тигриное, Центральный Сихотэ-Алинь // Петрология. 1998. Т. 6. № 1. С. 16–29.
- Руб А.К., Руб М.Г. Редкометалльные граниты Приморья. М.: ВИМС, 2006. 86 с.
- Смирнов С.З., Бортников Н.С., Гонецчук В.Г., Гореликова Н.В. Составы расплавов и флюидный режим кристаллизации редкометалльных гранитов и пегматитов Тигрино Sn–W месторождения (Приморье) // Докл. РАН. 2014. Т. 456. № 1. С. 95–100.
- Таусон Л.В. Геохимические типы и потенциальная рудоносность гранитоидов. М.: Наука, 1977. 280 с.
- Томсон И.Н., Тананаева Г.А., Полохов В.П. Взаимоотношения различных типов оловянного оруденения в южном Сихотэ-Алине (Россия) // Геология рудн. месторождений. 1996. Т. 38. № 4. С. 357–372.
- Травин А.В. Термохронология субдукционно-коллизиионных, коллизиионных событий Центральной Азии. Автореферат диссертации на соискание степени доктора геолого-минералогических наук. Новосибирск, 2016. 278 с.
- Ханчук А.И. Геологическое строение и развитие континентального обрамления северо-запада Тихого океана: автореф. дис. ... д-ра геол.-минер. наук. М., 1993. 31 с.
- Хетчиков Л.Н., Пахомова В.А., Гвоздев В.И., Руб А.К. Особенности флюидного режима некоторых гранитоидных систем Приморья // Владивосток: ДВО АН СССР. 1991. Препринт. 40 с.
- Baksi A.K., Aribald D.A., Farrar E. Intercalibration of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating standards // Chem. Geol. 1996. V. 129. P. 307–324.
- Behrens H., Jantos N. The effect of anhydrous composition on water solubility in granitic melts. American Mineralogist. 2001. V. 86. P. 14–20.
- Boynton W.V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies // Rare earth element geochemistry. Amsterdam et al.: Elsevier, 1984. P. 63–114.
- Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D. A geochemical classification for granitic rocks // J. Petrol. 2001. V. 42. P. 2033–2048.
- Gonevchuk V.G., Gonevchuk G.A., Kokorin A.M., Korostelev P.G., Semjenjak B.I. Rare Metal (Li–F) Granites and Related Mineralization in the Arminsky Ore District (Primorye, Russia) // Anatomy and Textures of Ore Bearing Granitoids of Sikhote Alin (Primorye Region, Russia) and Related Mineralization. Potsdam, 1998. P. 20–24.
- Huang W.-L., Wyllie P.J. Melting reactions in the system $\text{NaAlSi}_2\text{O}_8\text{--KAlSi}_3\text{O}_8\text{--SiO}_2$ to 35 kilobars, dry and excess water // J. Geol. 1975. V. 83. P. 737–48.
- Khanchuk A.I., Kemkin I.V., Kruk N.N. The Sikhote-Alin orogenic belt, Russian South East: Terranes and the formation of continental lithosphere based on geological and isotopic data // J. Asian Earth Sci. 2016. V. 120. P. 117–138.
- Le Maitre R.W. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Oxford: Blackwell, 1989. 193 p.
- Lehmann B. Formation of tin ore deposits: A reassessment // Lithos. 2021. P. 402–403.
- Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids // Geological Society of America Bulletin. 1989. V. 101. P. 635–643.
- Morgan G.B., London D. Effect of current density on the electron microprobe analysis of alkali aluminosilicate glasses // American Mineralogist. 2005. V. 90. P. 1131–1138.
- Newman S., Lowenstern J.B. Volatile Calc: a silicate melt– H_2O – CO_2 solution model written in Visual Basic for excel // Computers & Geosciences. 2002. V. 28. № 5. P. 597–604.
- Rickwood P.C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements // Lithos. 1989. V. 22. P. 247–263.
- Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. Blackwell, Oxford, 1985.
- Steiger R.H., Jager E. Subcommittee on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology // Earth Planet. Sci. Letters. 1977. P. 36. P. 359–361.
- Thomas R., Webster J.D., Heinrich W. Melt inclusions in pegmatite quartz: complete miscibility between silicate melts and hydrous fluids at low pressure // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2000. V. 144. P. 457–472.
- Thomas R., Rhede D., Trumbull R.B. Microthermometry of volatile-rich silicate melt inclusion in granitic rocks // Zeitschrift für Geologische Wissenschaften. 1996. V. 24. P. 507–528.
- Tischendorf G., Gottesmann B., Forster H.J., Trumbull R.B. On Li-bearing micas: estimating Li from electron microprobe analyses and an improved diagram for graphical representation // Mineralogical Magazine. 1997. V. 61. № 6. P. 809–834.