

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки Института геологии  
и минералогии им. В.С. Соболева

Сибирского отделения Российской  
академии наук,

академик РАН

Покшленко Николай Петрович



« 18 » июня 2015 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева  
Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН).**

Диссертация «**Флюидный режим магматического этапа развития редкометалльных гранитно-пегматитовых систем: петрологические следствия**» выполнена в лаборатории термобарогеохимии (№ 436) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук.

В период подготовки диссертации соискатель **Смирнов Сергей Захарович** работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук в лаборатории термобарогеохимии (№436) в должности старшего научного сотрудника.

В 1988 г. окончил с отличием геолого-геофизический факультет Новосибирского государственного университета (ныне федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет») по специальности «геология». В 1997 году защитил кандидатскую диссертацию «Включения минералообразующей среды в синтетических и природных драгоценных камнях» по специальности 04.00.20 – «минералогия, кристаллография».

**По итогам обсуждения принято следующее заключение:**

**Объектами исследования** диссертационной работы С.З. Смирнова являются редкометалльные граниты и пегматиты, обогащенные фтором и бором.

**Актуальность исследований.** Многочисленные экспериментальные исследования поведения воды, HCl и HF, проведенные с начала 60х годов XX века, создали теоретическую основу, позволяющую предложить целый ряд генетических моделей эволюции силикатных расплавов, богатых летучими компонентами. Следующие за ними результаты геолого-минералогических, геохимических и термобарогеохимических исследований позволили разработать несколько различных моделей развития конкретных природных гранитных и пегматитовых комплексов. Однако анализ публикаций показывает, что среди современных моделей развития флюидонасыщенных гранитных и пегматитовых систем много противоречий и взаимных исключений. В частности нет

единого мнения о том, при каких параметрах и степенях закристаллизованности расплава происходит обособление собственной флюидной фазы, сколько флюидных (некристаллических) фаз сосуществует на завершающих стадиях кристаллизации гранитных и пегматитовых расплавов, какова роль этих фаз в минералообразовании и перераспределении вещества, каковы причины различной рудогенерирующей активности различных гранитоидных магм.

Отсутствие общепринятых моделей эволюции водонасыщенных гранитных магм, необходимость согласования полученной по ним термобарогеохимической информации с результатами современных экспериментов в водно-солевых системах определяют актуальность исследований, проведенных на основе современных микроаналитических и термобарогеохимических методов.

**Наиболее важные научные результаты, полученные соискателем:**

**Доказано, что**

1. Борная кислота и ее солевые производные являются важнейшими компонентами магматогенных пегматитовых флюидов. Низкие концентрации в растворах включений хлора и фтора и наличие дочерних кристаллов пентаборатов предполагает, что среда при высоких Р-Т параметрах имела слабощелочной характер. Экспериментально установлено, что в зависимости от температуры, щелочности флюида и наличия в нем фтора, бор в гидротермальных растворах может присутствовать в виде борной кислоты, щелочно-боратно-силикатных, полиборатных и фторзамещенных щелочно-боратных комплексов.

2. Водно-силикатные жидкости образуются либо путем постепенной трансформации из силикатных расплавов, либо осаждением из водного флюида, богатого щелочами, фтором и бором. Водно-силикатные жидкости имеют консистенцию коллоидных растворов – гелей и обладают способностью к экстремальному концентрированию редких литофильных элементов, фтора и бора. Водно-силикатные жидкости являются средой кристаллизации кварца и силикатов, не обладают способностью к быстрой закалке и могут существовать при параметрах, характерных для низкотемпературных гидротермальных процессов.

3. Наиболее поздние силикатные жидкости заключительных стадий формирования редкометалльных гранитов и турмалиноносных миароловых гранитных пегматитов экстремально обогащены водой, фтором, бором и редкими литофильными элементами. Они формируют преимущественно слюдистые парагенезисы, богатые рудной минерализацией (касситерит, тантало-ниобаты, лепидолит, поллуцит и др.), приуроченные к миароловым полостям.

4. При образовании миароловых пегматитов, богатых фтором, бором и редкими щелочами, кристаллизация происходит в гетерогенной среде. Образование пегматоидных агрегатов, околомароловых ассоциаций и друзового комплекса происходит при 600-650 °С и 2,8 – 3,8 кбар из водно-силикатной жидкости, имеющей консистенцию геля, и водного флюида. Состав и рудный потенциал этих парагенезисов определяется тем, что водно-силикатные жидкости аккумулируют F, Ca, K, Ta, Nb, в то время как водный флюид концентрирует B, Sb, As, W, а Na, Be и Cs могут накапливаться как в водной, так и в силикатной фазе.

**Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации:** основу диссертации составляют исследования, проведенные в период 1990-2014 гг. Большая часть исследований является частью работы больших коллективов. Во всех этих работах автор лично проводил исследования включений всеми, перечисленными в работе методами. Открытие ортоборной кислоты, как компонента природных пегматитовых флюидов, является заслугой автора работы, так как им лично были проведены спектрометрические измерения включений и интерпретация полученных спектров. Автор лично участвовал в разработке метода определения концентрации ортоборной кислоты во включениях по данным микротермометрии. При проведении экспериментальных исследований личный вклад автора заключался в формулировке задач, разработке

методических подходов в исследовании продуктов эксперимента и интерпретации результатов. Под руководством и при личном участии автора разработана автоклавная методика прогрева расплавных включений под давлением воды с последующим контролем герметичности. Автор лично принимал участие в экспедиционных работах на Малханском пегматитовом поле (Ц. Забайкалье), на Юго-Западном Памире (ж. Лесхозовская) и Калгутинском месторождении (Горный Алтай).

**Высокая степень достоверности и обоснованности результатов проведенных исследований.** Результаты диссертационной работы Смирнова С.З., ее научные положения и выводы являются достоверными и обоснованными. Достоверность представленных результатов исследования включений водных растворов и силикатных расплавов в минералах редкометалльных гранитов и пегматитов, а также продуктов гидротермального эксперимента основывается на высоком методическом уровне проведения работы, представительности и достоверности исходных данных, а также корректном использовании общепринятых методик исследования включений в минералах и микроанализа.

Применительно к проблематике диссертации результативно **использован** комплекс современных методов минералого-петрографических, петрохимических, геохимических и термобарогеохимических исследований.

Основное внимание в работе уделялось методам изучения включений минералообразующих сред (Ермаков 1950, 1972; Базарова и др., 1975; Реддер, 1987; Соболев, 1996, Данюшевский, 2002), позволяющим получать уникальную первичную информацию о составах и физических свойствах минералообразующих растворов и расплавов. Термобарогеохимические исследования включений минералообразующих сред проводились в пластинках, полированных с двух сторон. Главное внимание уделялось определению сингенетичности флюидных и расплавных включений. Включения исследовались методами микротермометрии при температурах от  $-180$  до  $+300$  °С (микротермокамера Linkam THMSG-600, криокамера конструкции Л.Ш. Базарова) и от комнатной температуры до  $750$  °С. Для предотвращения разгерметизации расплавных включений при высокотемпературных прогревах была специально разработана методика прогрева в автоклаве методом закалки. Для исключения включений перенаполненных водой из автоклава, прогревы проводились под давлением тяжелой воды, а контроль их герметичности проводился методами КР и ИК спектроскопии по наличию или отсутствию линий D-O колебаний. Прогревы расплавных включений во вкрапленниках редкометалльных гранитов проводились как под сдерживающим давлением, так и при атмосферном давлении с визуальным наблюдением в термокамерах с силитовым нагревателем конструкции М.Ю. Михайлова и В.С. Шацкого (1974) и в микротермокамере с инертной средой конструкции Н.Ю. Осоргина и А.А. Томиленко (1990).

Петрохимические и геохимические исследования и определения составов фаз включений проводились с помощью методов рентгенофлуорисцентного анализа (РФА), масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (масс-спектрометры ELEMENT фирмы Finnigan Mat (ИГМ СО РАН), а также HP4500 и Agilent7500 (Университет Тасмании, Хобарт, Австралия)), а также вторично-ионной масс-спектрометрии (ионный зонд Cameca ims-4f) в филиале Физико-технологического института РАН (г. Ярославль). Минералого-петрографические исследования и наблюдения включений минералообразующих сред проводились методами оптической микроскопии на микроскопах OLYMPUS BX-51, снабженных цифровыми фотокамерами высокого разрешения ColorView III и Infinity 5). Исследование, диагностика твердых фаз во включениях и определение их состава производилось методами рентгеноспектрального анализа: методом ЭДС на сканирующих электронных микроскопах Jeol JXM-5, LEO 1430 VP, Tescan Mira 3 LMU (ИГМ СО РАН) и FEI Quanta 600 MLA (Университет Тасмании, Хобарт, Австралия); методом ВДС на рентгеноспектральных микроанализаторах Cameca Camebax-Micro, Jeol JXA-8100 (ИГМ СО РАН), Cameca SX-100 (Университет Тасмании,

Хобарт, Австралия), Jeol JXA-8200 (Институт химии имени Макса Планка, Майнц, Германия). Исследование газовых, жидких и кристаллических фаз включений и продуктов экспериментов производилось методами спектроскопии комбинационного рассеяния (рамановской спектроскопии) на приборах X-Y Dylor, Jobin Yvon U-1000 и Horiba Lab Ram HR 800 (ИГМ СО РАН), Triplemate Spex (ИНХ СО РАН) и ИК спектроскопии на приборах Bruker Vertex 70 с микроскопом Hyperion 2000 (FTIR) и Specord M-80 (ИГМ СО РАН). Во всех случаях применения количественных анализов особое внимание уделялось калибровке приборов и контролю качества анализа по хорошо охарактеризованным стандартам. Для учета потери Na при анализе водосодержащих силикатных стекол методами рентгеноспектрального микроанализа были специально разработаны методики.

Результаты исследований апробированы на российских и зарубежных конференциях, а также опубликованы в рецензируемых журналах.

**Научная новизна.** В ходе исследований, результаты которых легли в основу данной, работы **впервые было обосновано** существование в природе водно-борнокислых флюидов, получены новые принципиальные данные о составе наиболее поздних порций силикатных жидкостей, участвующих в образовании гранитов и миароловых гранитных пегматитов, обогащенных В, F и редкими металлами, **установлено** агрегатное состояние и **обоснована** роль этих жидкостей в гранито- и пегматитообразовании. Впервые экспериментально **установлен** механизм образования водно-силикатных жидкостей (тяжелого флюида) в системах гранит – соль – вода, **установлена** роль флюсующих компонентов в формировании водно-силикатных жидкостей и перераспределении рудного вещества между водно-силикатными жидкостями и водным флюидом. Впервые **показано**, что в пегматитовых системах реализуется постепенная трансформация силикатного расплава в водно-силикатную жидкость. **Обосновано**, что водно-силикатные жидкости являются разновидностью нанодисперсных коллоидных систем. Впервые **показаны** особенности комплексообразования бора во флюидно-магматических системах, богатых щелочными металлами и фтором.

**Практическая значимость и ценность научной работы соискателя:** Ценность выполненных исследований заключается в том, что получен большой массив данных по составам сосуществующих водных и силикатных минералообразующих сред, что является основой для развития теорий корового петрогенеза и рудообразования. Полученные экспериментальные данные расширяют представления о генезисе силикатных жидкостей и их роли в перераспределении важных для рудообразования компонентов в природных процессах. Результаты исследования включений в минералах и предложенные подходы к их интерпретации являются основой для дальнейшего развития теоретических представлений об эволюции коровых флюидно-магматических систем.

**Соответствие диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите:** Диссертационная работа С.З. Смирнова представляет собой научно-квалификационную работу, посвященную реконструкции флюидного режима очагов редкометалльно-гранитных и пегматитовых магм. Область исследования полностью **соответствует формуле специальности 25.00.04 по геолого-минералогическим наукам**, а именно пункту: **2 – Магматическая петрология: петрография, петрохимия и геохимия магматических пород; расплавные и флюидные включения в минералах магматических пород как критерии условий образования; источники магматических расплавов; физико-химические условия возникновения, существования и эволюции расплавов; процессы дифференциации, смешения и расслоения магматических расплавов.**

**Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем:** Основные научные результаты и материалы диссертационного исследования достаточно полно изложены в научных публикациях соискателя С.З. Смирнова (с соавторами). Соискатель имеет 115 опубликованных работ, из них по теме диссертации опубликованы 51 научная работа, в том числе **17 статей в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень российских и иностранных**

**рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций**, 34 работы в материалах всероссийских и международных конференций и одна монография (в соавторстве).

**Основные публикации соискателя, в которых опубликованы материалы диссертации:**

*Статьи в рецензируемых научных журналах, перечня ВАК:*

1. Рейф Ф.Г., Прокофьев В.Ю., Боровиков А.А., Борисенко А.С., Стельмачонок К.З., Пахомова В.Р., **Смирнов С.З.**, Бакуменко И.Т., Гимон В.О., Берзина А.П., Степанов С.Н., Кормушин В.А., Карпухина В.С., Ишков Ю.М. О концентрации металлов в рудообразующих растворах // Доклады АН, т. 325, 3, 1992, с 585-589

2. **Смирнов С.З.**, Перетяжко И.С., Прокофьев В.Ю., Загорский В.Е., Шебанин А.П. Первая находка сассолина ( $H_3BO_3$ ) во флюидных включениях в минералах // Геология и Геофизика, 2000, т. 41, № 2, с 194–206

3. Перетяжко И.С., Прокофьев В.Ю., Загорский В.Е., **Смирнов С.З.** Борные кислоты в процессах пегматитового и гидротермального минералообразования: петрологические следствия открытия сассолина ( $H_3BO_3$ ) во флюидных включениях // Петрология, 2000, т. 8, № 3, pp 241–266

4. **Смирнов С.З.**, Загорский В.Е., Перетяжко И.С., Михайлов М.Ю. Включения необычных позднемагматических расплавов в кварце пегматитовой жилы Октябрьская (Малханское поле, Центральное Забайкалье) // Доклады Академии Наук, 2003, Т. 392, №2 С. 239-243

5. Peretyazhko I.S., Zagorsky V.Ye., **Smirnov S.Z.**, Mikhailov M.Y. Conditions of pocket formation in the Oktyabrskaya tourmaline-rich gem pegmatite (the Malkhan field, Central Transbaikalia, Russia) // Chemical Geology, 2004, 210, pp. 91 - 111

6. **Smirnov S.Z.**, Thomas V.G., Demin S.P., Drebushchak V.A. Experimental study of boron solubility and speciation in the  $Na_2O-B_2O_3-SiO_2-H_2O$  system // Chemical Geology, 2005, 223, pp. 16-34

7. Перетяжко И.С., **Смирнов С.З.**, Котельников А.Р., Котельникова З.А. Экспериментальное изучение системы  $H_3BO_3-NaF-SiO_2-H_2O$  при 350–800°C и 1–2 кбар методом синтетических флюидных включений // Геология и геофизика, 2010, т. 51, № 4, с. 450-472

8. **Смирнов С.З.**, Томас В.Г., Соколова Е.Н., Куприянов И.Н. Экспериментальное исследование герметичности включений водосодержащих силикатных расплавов при внешнем давлении  $D_2O$  при 650 °C и 3 кбар // Геология и геофизика, 2011, т.52, №5, сс. 690-703

9. Соколова Е.Н., **Смирнов С.З.**, Астрелина Е.И., Анникова И.Ю., Владимиров А.Г., Котлер П.Д. Состав, флюидный режим и генезис онгонит-эльвановых магм Калгутинской рудно-магматической системы (Горный Алтай) // Геология и геофизика, 2011, т. 52, №11, с. 1748-1775

10. 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.П., Котлер П.Д., Мороз Е.Н., Гаврюшкина О.А. Литиевые месторождения сподуменовых пегматитов Сибири // Химия в интересах устойчивого развития, 2012, т. 20, с. 3-20

11. **Smirnov S.Z.**, Thomas V.G., Kamenetsky V.S., Kozmenko O.A. Hydrosilicate liquids in the system  $Na_2O-SiO_2-H_2O$  with NaF, NaCl and Ta: evaluation of their role in ore and mineral formation at high T and P // Петрология, 2012, т. 20, №3, с. 300-314

12. Владимиров А.Г., Фан Лыу Ань, Крук Н.Н., **Смирнов С.З.**, Анникова И.Ю., Павлова Г.Г., Куйбида М.Л., Мороз Е.Н., Соколова Е.Н., Астрелина Е.И. Петрология оловоносных гранит-лейкогранитов массива Пиа Оак, Северный Вьетнам // Петрология, 2012, т. 20, №6, с. 599-621

13. Анникова И.Ю., Владимиров А.Г., **Смирнов С.З.**, Уваров А.Н., Гертнер И.Ф., Гаврюшкина О.А. Геология и минералогия сподуменовых пегматитов Горной Шории // Вестник Томского государственного университета, 2013, №376, С. 168-174

14. 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. Крупные поля сподуменовых пегматитов в обстановках рифтогенеза и постколлизийного растяжения в континентальной литосфере // Геология и геофизика, 2014, Т. 55, №2, С. 303-322

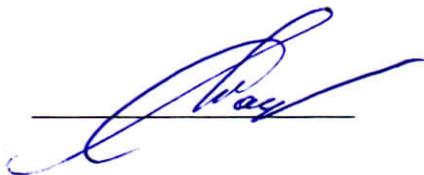
15. Томас В.Г., **Смирнов С.З.**, Козьменко О.А., Дребушак В.А., Каменецкий В.С. Образование и свойства водно-силикатных жидкостей в системах  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  и гранит- $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  при 600 °С и 1.5 кбар // Петрология, 2014, Т.22, №3, С. 327-344

16. Хромых С.В., Соколова Е.Н., **Смирнов С.З.**, Травин А.В., Анникова И.Ю. Геохимия и возраст редкометалльных дайковых поясов Восточного Казахстана // Доклады РАН, 2014, Т. 459, №5, С. 612-617

17. **Смирнов С.З.**, Бортников Н.С., Гоневчук В.Г., Гореликова Н.В. Составы расплавов и флюидный режим кристаллизации редкометалльных гранитов и пегматитов тигриного Sn-W месторождения (Приморье) // Доклады РАН, 2014, Т.465, №1, С. 95-100

Диссертация «Флюидный режим магматического этапа развития редкометалльных гранитно-пегматитовых систем: петрологические следствия» Смирнова Сергея Захаровича рекомендуется к защите на соискание учёной степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.04 – «петрология, вулканология».

Заключение принято на расширенном заседании лаборатории термобарогеохимии ИГМ СО РАН (№436). Присутствовало на заседании – 44 человека (из них 13 докторов геол.-мин. наук, 1 доктор техн. наук, 1 доктор физ.-мат. наук, 25 кандидатов геол.-мин. наук, 1 кандидат физ.-мат. наук, а также 2 м.н.с без степени и 1 инженер). Результаты открытого голосования по вопросу принятия заключения по диссертации С.З. Смирнова: «за» – 44 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 2014/1 от 26.12.2014 г.



Заключение оформил:

Томиленко Анатолий Алексеевич, доктор. геол.-мин. наук, зам. директора по науке, зав. лаб. 436.