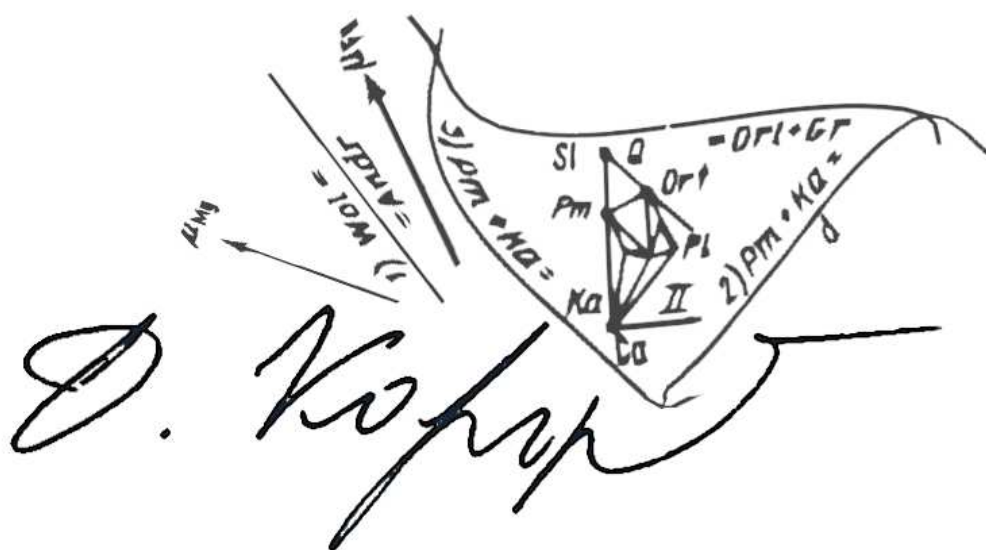


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской  
академии наук  
(ИГЕМ РАН)

Всероссийская конференция,  
посвященная 120-летию со дня рождения выдающегося  
российского ученого академика Д.С. Коржинского

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ПЕТРО- И РУДОГЕНЕЗА: НОВЫЕ РУБЕЖИ



Москва, ИГЕМ РАН, 7-9 октября 2019 года

УДК 553.21/24

ББК 26.3

Ф50

Физико-химические факторы петро- и рудогенеза: новые рубежи. Всероссийская конференция, посвященная 120-летию со дня рождения выдающегося российского ученого академика Д.С. Коржинского. Москва, 7-9 октября 2019 г. Материалы конференции. Электрон. дан. (1 файл: 14 Мб) – М.: ИГЕМ РАН, 2019.

В сборнике представлены материалы Всероссийской конференции, посвященной 120-летию со дня рождения выдающегося российского ученого академика Д.С. Коржинского. Доклады охватывают широкий спектр результатов экспериментального и теоретического моделирования магматических, метаморфических и гидротермальных систем, компьютерного моделирования геодинамических процессов, реконструкции закономерностей физико-химических режимов петро- и рудогенеза в различных геодинамических обстановках.

**Редакционный совет:** Акинфиев Н.Н., Аранович Л.Я., Арискин А.А., Бортников Н.С., Гирнис А.В., Добрецов Н.Л., Дубинина Е.О., Жариков А.В., Когарко Л.Н., Ковригина С.В., Петров В.А., Подлесский К.К., Сафонов О.Г., Силантьев С.А., Ханчук А.И., Чернышев И.В., Ярмолюк В.В.

ISBN 978-5-88918-057-9

© Коллектив авторов, 2019

© ИГЕМ РАН, 2019

***Организационный комитет:***

Председатель чл.-корр. РАН В.А. Петров, директор ИГЕМ РАН, Москва

Зам. председателя Устинов С.А., к.г.м.н., ИГЕМ РАН, Москва

Члены Организационного комитета:

Амплиева Е.Е., к.г.м.н., ИГЕМ РАН, Москва

Аникина Е.Ю., к.г.м.н., ИГЕМ РАН, Москва

Жариков А.В., д.т.н., ИГЕМ РАН, Москва

Каргин А.В., к.г.м.н., ИГЕМ РАН, Москва

***Программный комитет:***

Председатель академик РАН Н.С. Бортников, ИГЕМ РАН, Москва

Зам. председателя Аранович Л.Я., чл.-корр. РАН, ИГЕМ РАН, Москва

Члены Программного комитета:

Акинфиев Н.Н., д.х.н., ИГЕМ РАН, Москва

Арискин А.А., д.г.м.н., ГЕОХИ РАН, Москва

Гирнис А.В., д.г.м.н., ИГЕМ РАН, Москва

Добрецов Н.Л., академик РАН, ИГМ СО РАН, Новосибирск

Дубинина Е.О., д.г.м.н., ИГЕМ РАН, Москва

Когарко Л.Н., академик РАН, ГЕОХИ РАН, Москва

Лиханов И.И., д.г.м.н., ИГМ СО РАН, Новосибирск

Перчук А.Л., д.г.м.н., МГУ, Москва

Прокофьев В.Ю., д.г.м.н., ИГЕМ РАН, Москва

Соболев Н.В., академик РАН, ИГМ СО РАН, Новосибирск

Сафонов О.Г., профессор РАН, ИЭМ РАН, Черноголовка

Силантьев С.А., д.г.м.н., ГЕОХИ РАН, Москва

Смирнов С.З., д.г.м.н., ИГМ СО РАН, Новосибирск

Ханчук А.И., академик РАН, ДВГИДВО РАН, Владивосток

Чернышев И.В., академик РАН, ИГЕМ РАН, Москва

Ярмолюк В.В., академик РАН, ИГЕМ РАН, Москва

***Ученый секретарь конференции*** Подлесский К.К., к.г.м.н., ИГЕМ РАН, Москва

***Группа учёного секретаря:***

Гусева А.С., ИГЕМ РАН, Москва

Ковригина С.В., ИГЕМ РАН, Москва

Кондрашов И.А., ИГЕМ РАН, Москва

Лексин А.Б., ИГЕМ РАН, Москва

Яровая Е.В., ИГЕМ РАН, Москва

## **Флюидно-магматическое взаимодействие гранулитового комплекса и кратона (на примере Южной Краевой Зоны комплекса Лимпопо, ЮАР)**

**Сафонов О.Г.<sup>1,2,3</sup>, ван Риннен Д.Д.<sup>3</sup>, Смит К.А.<sup>3</sup>, Япаскурт В.О.<sup>2,1</sup>, Варламов Д.А.<sup>1</sup>, Митяев А.С.<sup>2,1</sup>, Голунова М.А.<sup>1</sup>, Бутвина В.Г.<sup>1</sup>, Белянин Г.А.<sup>3</sup>, Элбург М.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> ИЭМ РАН им. Д.С. Коржинского, Черноголовка, oleg@iet.ac.ru, <sup>2</sup> МГУ, Москва, <sup>3</sup> Университет Йоханнесбурга, Йоханнесбург, ЮАР

Главными структурными составляющими докембрийской континентальной коры являются кратоны – крупные консолидированные блоки палео-мезоархейского возраста, под которыми располагается холодная деплетированная мощная литосферная мантия (напр. Gerya, 2014). Кратоны соединены между собой более молодыми складчатыми зонами, которые обычно включают региональные области высокометаморфизованных пород (гранулитовые комплексы). Современные модели структуры континентальной коры предполагают, что именно породы гранулитовой фации метаморфизма слагают низы коры кратонов. Для объяснения подъема гранулитов из низов коры вдоль границ кратонов предлагаются различные, порой альтернативные, механизмы (напр. Gerya, 2014). Однако, вне зависимости от механизма подъема, все эти модели так или иначе подразумевают активное взаимодействие горячих гранулитов с породами кратонов. Метаморфизм пород кратонов при воздействии на них гранулитовых аллохтонов сопровождается проникновением в гранулиты потоков флюидов и магм. Для создания моделей взаимодействия кратонов с гранулитовыми комплексами необходима информация о Р-Т условиях, трендах и времени метаморфизма пород кратонов, погруженных под гранулиты, а также данные о флюидном режиме и магматизме, сопровождающих этот процесс.

В данной работе обсуждаются некоторые аспекты такого взаимодействия на примере гранулитового комплекса Лимпопо – неоархейской-палеопротерозойской складчатой области, сформировавшейся на границах кратонов Зимбабве и Каапвааль (Южная Африка) (van Reenen et al., 2019 и ссылки в этой работе). На основе структурных и литологических характеристик пород комплекс Лимпопо подразделяется на Северную Краевую Зону, Центральную зону и Южную Краевую Зону (ЮКЗ), которые сопряжены друг с другом и с прилегающими кратонами по крупным региональным зонам сдвиговых деформаций (van Reenen et al., 2019). В ЮКЗ, надвинутой на кратон Каапвааль, наиболее четко проявлены процессы, связанные со взаимодействием гранулитового комплекса и кратона. В этой зоне выявлен лишь один тектоно-метаморфический цикл с пиком метаморфизма в период 2.72-2.71 млрд. лет, после которого в интервале 2.71-2.67 млрд. лет гранулиты были эксгумированы и надвинуты на кратон Каапвааль вдоль региональной зоны сдвиговых деформаций Хоут-Ривер. Р-Т тренды «по часовой стрелке», характеризующие метаморфическую эволюцию пород кратона в контакте с ЮКЗ, указывают на их погружение на глубины 16-20 км (5.5-6.5 кбар) и прогрев до 570-650°C, а возможно, и более, отражая так называемый метаморфизм «горячего утюга» ("hot iron metamorphism") (van Reenen et al., 2019). Погруженные под гранулиты породы кратона, вероятно, представляли собой серию различных блоков, вовлеченных в единую с гранулитами метаморфическую эволюцию на разных уровнях в коре, но имеющие при этом единый источник тепла – горячие гранулиты. Это выражается в том, что петлеобразные Р-Т тренды пород кратона тесно сопряжены с трендами декомпрессии-остывания гранулитов ЮКЗ.

Прогрессивный метаморфизм пород кратона при их погружении под гранулиты сопровождался подъемом в гранулиты флюидов, включавших как углекислоту, так и водно-солевую составляющие (van Reenen et al., 2014). Этот процесс записан в обширном развитии ассоциаций антофиллита и жедрита в метапелитах, ассоциаций хлорита и талька с доломитом и магнезитом в ультраосновных гранулитах и амфибола в основных гранулитах

(van Reenen et al., 2014). Возраст этой флюидной проработки составляет 2.66–2.67 млрд. лет, а изотопный состав углерода в карбонатах (-5.5 – -6.0‰), образованных в этом процессе, указывает на внешний источник флюидов. Этим источником, очевидно, могли служить погруженные под гранулиты ЮКЗ породы гранит-зеленокаменных областей кратона. Действительно, указанный выше изотопный состав углерода хорошо соответствует интервалу значений изотопного состава углерода для карбонатов в породах зеленокаменных поясов, включающих ультрабазитовые, базитовые и пелитовые разности (-2.0 – 7.5 ‰).

Помимо ослабленных тектонических зон, потенциальными проводниками флюидов в ЮКЗ служили гранитоидные магмы. В период 2.67-2.69 млрд. лет они образовывали как крупные батолиты (диорит-гранодиорит-монцогранитовый батолит Маток), так и более мелкие тела гранатсодержащих трондьемитов (Safonov et al., 2014, 2018a, b, c). Возраст этих интрузий совпадает с временем надвига ЮКЗ на кратон Каапвааль, что дает основание для вывода о том, что образование гранитоидных магм было непосредственно связано с тектоническим взаимодействием гранулитов и пород гранит-зеленокаменных областей кратона. Минеральные ассоциации гранитоидов отражают температуры магм 850-1000°C, кристаллизовавшихся при давлениях 6-9 кбар. Геохимические характеристики гранитоидов близки к таковым для пород тоналит-трондьемит-гранодиоритовых комплексов (ТТГ), указывая на то, что протолитом для гранитоидных магм служили, скорее всего, основные породы. Гранитоидные магмы ассимилировали вмещающие породы, что провоцировало появление в гранитоидах граната, шпинели, силлиманита, корунда (Safonov et al., 2014, 2018a). Принципиальной характеристикой этих магм является участие в их эволюции богатых CO<sub>2</sub> флюидов. Это подтверждается обилием плотных углекислых флюидных включений в кварце и гранате гранитоидов, находками уникальных первичных карбонатно-силикатных (Mg-Fe-Са карбонаты + пирофиллит) полифазных микровключений в гранатах, наличием высокотемпературного графита в некоторых образцах гранитоидов. Оценки состава флюида на основе минеральных ассоциаций указывают на заметное преобладание углекислой составляющей во флюиде, сопровождавшим гранитоиды. Изотопный состав углерода графита (-6.5 – -8.6‰) и флюидных включений (-4.10±1.2 ‰) подтверждают внешний источник этих флюидов, не связанный с вмещающими метапелитовыми породами ЮКЗ (Safonov et al., 2018a). Определяющая роль CO<sub>2</sub> в эволюции гранитоидных магм ЮКЗ и изотопные данные для углерода указывают на происхождение флюидов, а возможно и самих гранитоидных магм, из гетерогенного карбонатсодержащего источника. Им вполне могли служить гетерогенные карбонатсодержащие вулканогенно-осадочные толщи зеленокаменных поясов кратона Каапвааль, испытавшие проградный метаморфизм при погружении под гранулиты ЮКЗ.

Насыщенные флюидами горячие гранитоидные магмы, формируя так называемые инъекционные комплексы в пределах ЮКЗ, способствовали процессу подъема гранулитового комплекса, а также оказывали термальное и флюидное воздействие на гранулиты (Safonov et al., 2018b, c). Вокруг интрузий возникали локальные зоны флюидной проработки и частичного плавления. Например, в метапелитах ЮКЗ продукты частичного плавления выявлены в виде пятен и линз, главным минералом которых является высокоглиноземистый ортопироксен, который в зависимости от флюидного режима и температуры сосуществует либо с гранатом и калиевым полевым шпатом (+плагиоклаз+кварц), либо с биотитом (+плагиоклаз+кварц). Связь этих образований с интрузиями подтверждается их более поздним положением по отношению к структурным элементам вмещающих пород, а также U/Pb возрастными монацитов в этих ассоциациях, порядка 2.67 млрд. лет (Safonov et al., 2018c). Проникновение углекислых и водно-солевых флюидов с низкой активностью воды (0.31 – 0.17) из кристаллизирующихся магм в гранулиты обуславливало метасоматические реакции с образованием ассоциаций, включающих биотит, Na-содержащий жедрит, карбонаты, графит.

Все рассмотренные выше процессы отображают активное динамическое и флюидно-магматическое взаимодействие гранулитовых комплексов с породами окружающих кратонов, которое должно учитываться в создании общей модели эволюции докембрийской континентальной коры.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, грант № 18-17-00206 и в соответствии темы НИР АААА-А18-118020590148-3 ИЭМ РАН.*

Gerya T.V. Precambrian geodynamics: concepts and models // *Gondwana Research*. 2014. V. 25. P. 442-463.

van Reenen D.D., Smit C.A., Perchuk A.L., Huizenga J.M., Safonov O.G., Gerya T.V. The Neoproterozoic Limpopo Orogeny: Exhumation and Regional-Scale Gravitational Crustal Overturn Driven by a Granulite Diapir // *The Proterozoic Geology of the Kaapvaal Craton, Southern Africa*. 2019. Springer, Cham, P. 185-224.

van Reenen D.D., Huizenga J.-M., Smit C.A., Roering C. Fluid-rock interaction during high-grade metamorphism: instructive examples from the Southern Marginal Zone of the Limpopo Complex, South Africa // *Precambrian Research*. 2014. P. 63-80.

Safonov O.G., Tatarinova D.S., van Reenen D.D., Golunova M.A., Yapaskurt V.O. Fluid-assisted interaction of peraluminous metapelites with trondhjemitic magma within the Petronella shear-zone, Limpopo Complex, South Africa // *Precambrian Research*. 2014. V. 253. P. 114-145.

Safonov O.G., Reutsky V.N., Varlamov D.A., Yapaskurt V.O., Golunova M.A., Shcherbakov V.D., van Reenen D.D., Smit C.A., Butvina V.G. Composition and source of fluids in high-temperature graphite-bearing granitoids associated with granulites: Examples from the Southern Marginal Zone, Limpopo Complex, South Africa // *Gondwana Research*. 2018a. V. 60. P. 129-152.

Safonov O.G., van Reenen D.D., Yapaskurt V.O., Varlamov D.A., Mityaev A.S., Butvina V.G., Golunova M.A., Belyanin G.A., Smit C.A. Thermal and fluid effects of granitoid intrusions on granulite complexes: examples from the Southern Marginal Zone of the Limpopo Complex, South Africa // *Petrology*. 2018b. V. 26. P. 633-658.

Safonov O.G., Yapaskurt V.O., Elburg M., van Reenen D.D., Tatarinova D.S., Varlamov D.A., Golunova M.A., Smit C.A. P-T conditions, mechanism and timing of the localized melting of metapelites from the Petronella shear-zone and relationships with granite intrusions in the Southern Marginal Zone of the Limpopo Belt, South Africa // *Journal of Petrology*. 2018c. V. 59, P. 695-734.