

УДК 553.22+550.41+553.065

МЕТАСОМАТИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ АМФИБОЛИТОВ В КОРУНДСОДЕРЖАЩИЕ ПЛАГИОКЛАЗИТЫ: ЗОНАЛЬНОСТЬ, ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА (НА ПРИМЕРЕ УНИКАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ХИТОСТРОВ, ФЕННОСКАНДИНАВСКИЙ ЩИТ)

© 2023 г. С. А. Бушмин^а, *, А. Б. Кольцов^а, Ю. М. Лебедева^а, Е. В. Савва^а

^а Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: s.a.bushmin@ipgg.ru

Поступила в редакцию 17.11.2022 г.

После доработки 13.02.2023 г.

Принята к публикации 16.03.2023 г.

Представлены результаты исследования десицированных пород средней коры уровня амфиболитовой фации на примере корундсодержащих плагиоклазитов по метабазитам уникального месторождения Хитостров в Беломорско-Лапландском орогене Фенноскандинавского щита. Основное внимание уделено новым геологическим данным, документации и анализу метасоматической зональности, определению *P-T* условий ее формирования и модели метасоматического процесса.

Ключевые слова: метасоматоз, десиликация амфиболитов, корундовые плагиоклазиты, метасоматическая зональность, численное моделирование

DOI: 10.31857/S0869590323060079, **EDN:** FGYGLV

ВВЕДЕНИЕ

Флюиды играют значительную роль во всех процессах образования и преобразования пород коры и мантии, а в процессах метаморфизма и метасоматоза им принадлежит ведущая роль. Циркуляция флюидных потоков в широком диапазоне *P-T* условий сопровождается взаимодействием с окружающими породами. Это приводит к появлению на разных уровнях коры и литосферной мантии флюидов с контрастными, аномальными свойствами, определяющими способность вызывать метасоматоз (например, Аранович и др., 2010; Manning, 2013, 2018; Manning, Aranovich, 2014; Bebout, Penniston-Dorland, 2016; Аранович, 2017; Сафонов и др., 2019; Иванов, Бушмин, 2019; Manning, Frezzotti, 2020; Steele-MacInnis, Manning, 2020). Знания о химическом составе и свойствах флюидов являются фундаментальной основой для понимания причин геофизических аномалий, транспорта элементов и образования руд, в первую очередь, в земной коре, где сосредоточены и рудные месторождения, и очаги землетрясений. Свойства таких флюидов отражаются, прежде всего, в особенном минеральном составе метасоматических пород. Наиболее информативными для изучения свойств флюидов являются зоны инфильтрационного метасоматоза, состав которых в значительной степени определяется свойствами самих флюидов. К регионам, где метасоматическим явлениям

такого рода уделялось много внимания, относится Фенноскандинавский щит.

На Фенноскандинавском щите в Фенно-Карельском кратоне и в активных структурах, развивавшихся в неоархее–палеопротерозое (Беломорско-Лапландский коллизионный ороген), и в палеопротерозое (Свекофеннский акреционный ороген) (Глебовицкий, 1993; Глебовицкий и др., 1996; Glebovitsky, 1997; Балаганский, 2002; Слабунов, 2008; Mints et al., 2014; Bushmin, Glebovitsky, 2016; Lahtinen, Nuhma, 2019; Слабунов и др., 2021) исследования зон инфильтрационного метасоматоза в регионально метаморфизованных комплексах пород имеют многолетнюю историю. В процессе этих исследований были решены многие вопросы геологии и петрологии низкотемпературных, среднетемпературных и высокотемпературных инфильтрационных метасоматитов, насыщенных кремнеземом (например, Глебовицкий, Бушмин, 1983; Беляев и др., 1990 и ссылки там; Карта минеральных фаций ..., 1991; Левицкий, 2005; Аранович и др., 2009; Bushmin, Glebovitsky, 2016; Бушмин и др., 2020). Значительно меньше информации, касающейся инфильтрационных процессов, приводящих к образованию десицированных кварц-недо-сыщенных или бескварцевых пород (например, Колесник, 1976 и ссылки там; Терехов, Левицкий, 1991; Серебряков, Русинов, 2004; Серебряков, 2004; Аранович, Козловский, 2009).

Ярким примером зон инфильтрационных метасоматитов с десилицированными породами являются месторождения коллекционного корунда в Беломорской мегазоне (или Беломорском поясе), являющейся частью Беломорско-Лапландского орогена (рис. 1а). Большинство этих месторождений (Хитостров, Дядина Гора, Варацкое, Высота 128, Кулежда, Плотица, Пулонга, Лягкомина) сосредоточены в полосе протяженностью около 100 км в пределах Чупинского тектонического покрова, сложенного породами одноименной чупинской толщи (например, Терехов, Левицкий, 1991; Серебряков, 2004; Акимов, Кольцов, 2022 и ссылки там). Особое внимание обращает на себя месторождение Хитостров (рис. 1а), прежде всего, по двум причинам.

Во-первых, хотя на всех месторождениях окружающие метаморфические породы представлены и гнейсами, и амфиболитами (метабазитами), но только на Хитострове, по существующим представлениям, *Crn*¹-содержащие породы, богатые Са-*Amp* (преобладают) и без Са-*Amp* (относительно меньше), образовались при метасоматической десиликации исключительно окружающих *Ky-Grt-Bt* гнейсов (Серебряков, 2004; Акимов, Кольцов, 2022). В этих исследованиях корундосодержащие породы с высоким содержанием Са-*Amp* рассматриваются в качестве зоны метасоматической зональности, впервые установленной Н.С. Серебряковым (2004) среди $\pm Ky-Crn-Grt-Bt$ -плагиоклазитов и образованной по *Ky*-гнейсам.

Во-вторых, в окружающих метаморфических и *Crn*-содержащих метасоматических породах Хитострова обнаружено аномальное обогащение изотопом ¹⁶O. В *Crn*-содержащих породах значение $\delta^{18}O$ для минералов и пород достигает -27‰ (VSMOW) (например, Крылов, 2008; Устинов и др., 2008; Bindeman, Serebryakov, 2011; Высоцкий и др., 2011, 2014; Крылов, Глебовицкий, 2017). Оно значительно ниже, чем в любых других силикатных породах земного или космического происхождения, что определяет уникальность этого объекта и оправдывает продолжающееся многолетнее его изучение.

Проблемы причин и механизма первоначального фракционирования изотопов кислорода, определивших возникновение уникальной аномалии, в статье не затрагиваются, так как, по нашему мнению, происхождение “легкого” по изотопному составу кислорода флюида, участвующего в глубинных эндогенных процессах, в настоящее время остается на уровне предположений без сопровождения численной моделью. Вследствие этого пока не представляется возможным установить связь между степенью метасоматической переработки

исследованных пород и распределением в них изотопов кислорода.

В предлагаемом исследовании метасоматических процессов Хитострова обращается внимание на обилие амфиболитов среди окружающих гнейсов и на обычное присутствие среди зональных тел корундовых пород участков десилицированных амфиболитов, контакт которых с корундовыми плагиоклазитами представлен последовательностью минеральных зон, которая интерпретируется нами как минеральная метасоматическая зональность. Полученные данные свидетельствуют о том, что образование *Crn*-содержащих пород (каймы *Zrn* ~ 1.894 млн лет, Серебряков и др., 2007), прежде всего с повышенным содержанием Са-*Amp* (до 60–80%), не могло обойтись без участия в этих процессах амфиболитов в качестве исходного протолита. Факты присутствия в преобладающих на Хитострове корундоносных биотит-гранат-амфиболовых плагиоклазитах включений меланократовых *Grt*-амфиболитов, *Grt-Px-Bt-Pl* пород, существенно гранатовых и кварц-гранатовых пород, отмечались и ранее в работах, посвященных исследованиям изотопного состава кислорода в корундосодержащих породах (например, Высоцкий и др., 2011).

ПОРОДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ХИТОСТРОВ

Метаморфические породы

Крупные тела амфиболитов (метагаббро, магматический *Zrn* ~ 2291 млн лет, Zakharov et al., 2017) и мелкие линзовидные тела амфиболитов в гранат-биотитовых и кианит-гранат-биотитовых гнейсах присутствуют примерно в равных количествах с гнейсами в толще метаморфических пород, окружающих *Crn*-породы (рис. 1б). Минеральные ассоциации мигматизированных пород этой толщи (*Qz + Pl + Hb + Grt + Zo*, *Qz + Pl + Hb + Grt*, *Qz + Pl + Hb + Grt + Cpx*, *Qz + Pl + Bt + Ky + Grt ± Ms*, *Qz + Pl + Bt + Grt ± Ms*, *Qz + Pl + Bt + Ky ± Ms*, *Qz + Pl + Bt + Grt ± Kfs ± Ms*) соответствуют условиям средне- и высокотемпературной амфиболовой фации высоких давлений (*T* ~ 600–700°C, *P* ~ 8–10 кбар, кианит-биотит-мусковитовая и биотит-кианит-ортоклазовая субфации; Бушмин, Глебовицкий, 2008; Bushmin, Glebovitsky, 2016).

Амфиболиты разнообразны по структуре, текстуре, зернистости, составу и степени мигматизации и, соответственно, относительно содержанию минералов: Са-*Amp* (70–15%), *Grt* (5–30%), *Qz* (25–10%), *Pl* (5–40%), *Bt* (0–5%), $\pm Czo$ (~ 10%), $\pm Ep$, $\pm Cpx$, $\pm Ap$, *Tin*, *Ilm*. Главные разновидности: амфиболиты мелкозернистые-среднезернистые массивные или слабо гнейсовидные относительно меланократовые с высоким содержанием мелкого граната (1–3 мм) и амфиболиты мигматизированные, неравномернозернистые от среднезернистых

¹ Аббревиатура минералов согласно (Whitney, Evans, 2010).

до гигантозернистых с крупными порфиробластами граната (2–3 см) в Qz - Pl жильной лейкосоме или Qz - Pl пятнах. Мелкозернистый гранат может быть равномерно распределенным в относительно массивном меланократовом амфиболите или слагать ветвящиеся прожилки Qz - Grt состава. Он может также присутствовать в виде отдельных порфиробластов или их скоплений, ассоциирующих с Qz и Pl . Иногда присутствуют порфиробласты Spx ~1 см. Мигматизация амфиболитов сильно варьирует по степени проявления между отдельными зонами от сильной (до 40–50% лейкосомы) до слабой или может вообще отсутствовать.

Гнейсы представлены двумя главными разновидностями: мигматизированными биотитовыми и гранат-биотитовыми плагиогнейсами с редким мелким кианитом и мигматизированными кианит-гранат-биотитовыми плагиогнейсами с кварцевыми зонами кислотного выщелачивания ($Ky + Qz$). Количество главных минералов в гнейсах сильно зависит от степени мигматизации: в Bt и Grt - Bt гнейсах Qz (~10–20%), Pl (~35–65%), Bt (~5–30%), Grt (~0–5%), Ky ($\pm$ мелкие редкие зерна) и в Ky - Grt - Bt гнейсах Qz (~15–30%), Pl (~15–40%), Bt (~20–45%), Grt (~5–10%), Ky (~5–15%). В плагиогнейсах на продолжении зоны преимущественно бескварцевых пород в юго-восточном направлении (рис. 16) установлены участки с пониженным содержанием $Qz \leq 5\%$. Гранат часто присутствует в жильной лейкосоме. Калиевый полевой шпат иногда присутствует в лейкократовых разновидностях Grt - Bt гнейсов. В небольших количествах часто встречается мусковит.

Жильные, метасоматические породы и минеральная зональность

Геологическое положение, минеральные типы

Crn -содержащие породы приурочены к зоне северо-западного простирания, в которой сосредоточены в разной степени десилицированные продукты метасоматических изменений гетерогенной гнейсо-метабазитовой толщи. Для этой зоны характерна высокая концентрация жил и жилородных тел плагиоклазитов с околосильными метасоматическими породами, которые отражают пути инфильтрации внешнего флюидного потока и результаты его взаимодействия с вмещающими породами.

В северо-западном окончании зоны десиликации Crn -содержащие породы образуют каплевидное тело видимым размером 100 × 250 м, окруженное толщей кварцсодержащих амфиболитов и гнейсов (рис. 16). Контакты с Crn -содержащими породами всегда сложены бескварцевыми породами с Bt , Grt , Pl и Ca - Amp или с Ky около гнейсов (отдельные кристаллы Ky 5–8 см или их скопления), эти же породы встречаются и внутри тела Crn -со-

держащих пород. В юго-восточном направлении по простиранию зоны десиликации тело корундсодержащих пород постепенно сужается, выклинивается, сменяясь сначала бескварцевыми плагиоклазовыми породами с биотитом, грантом и кианитом, а затем отдельными многочисленными жилами и жилородными телами такого же состава только среди гнейсов. Таким образом, степень и интенсивность десиликации пород снижается, отражаясь в исчезновении корундовой минерализации (рис. 16).

Корундсодержащие породы представлены тремя главными минеральными типами. Первый тип – жилы плагиоклазитов (в разных сочетаниях содержат Grt , Bt , Ca - Amp , Crn). Второй и третий минеральные типы, слагающие зональные тела очень неоднородных по составу пород с корундом – это средне- и крупнозернистые гнейсовидные или почти массивные породы с Pl , Bt , Grt , $\pm Ky$, $\pm St$, не содержащие Ca - Amp , и породы с Ca - Amp , Pl , Bt , Grt , $\pm St$, единичные зерна Ged . Внешне Crn -содержащие породы могут быть похожи на гнейсы, но не содержат кварц. Также обращает на себя внимание их пространственная ассоциация в контактах с аналогичными по минеральному составу породами без корунда, что наблюдается в единых зональных телах. Породы, содержащие корунд, можно условно разделить на разновидности по относительному содержанию в них Pl : собственно плагиоклазиты ($Pl > 75\%$) и плагиоклазсодержащие лейкократовые ($Pl \sim 75$ –60%), мезократовые ($Pl \sim 60$ –40%), меланократовые ($Pl \sim 40$ –25%), мафические ($Pl < 25\%$) породы.

Жилы плагиоклазитов

Жилы плагиоклазитов мощностью от мм, см и до первых десятков см в целом ориентированы вдоль полосчатости и гнейсовидности пород с корундом, но в контактах часто обнаруживаются кососекающие и отчетливо секущие их взаимоотношения с текстурой вмещающей породы (рис. 2).

В составе жил плагиоклазитов среди корундсодержащих пород без Ca - Amp обычно присутствуют Bt , Grt , иногда Ky , Crn . Жилы плагиоклазитов ($Pl \sim 15$ –33% An) среди корундсодержащих пород с Ca - Amp обычно содержат Bt и Grt , часто Ca - Amp , Crn встречается внутри жил и нередко на контакте жил. Более мощные жильные тела (метры, первые десятки м) неправильной, изометричной формы обычно имеют отчетливо секущие контакты. В них могут присутствовать гранат, биотит и Ca -амфибол только в виде единичных зерен, корунд в них не был обнаружен.

Crn -содержащие породы по гнейсам

Десилицированные породы на контакте с гнейсами впервые были исследованы и детально

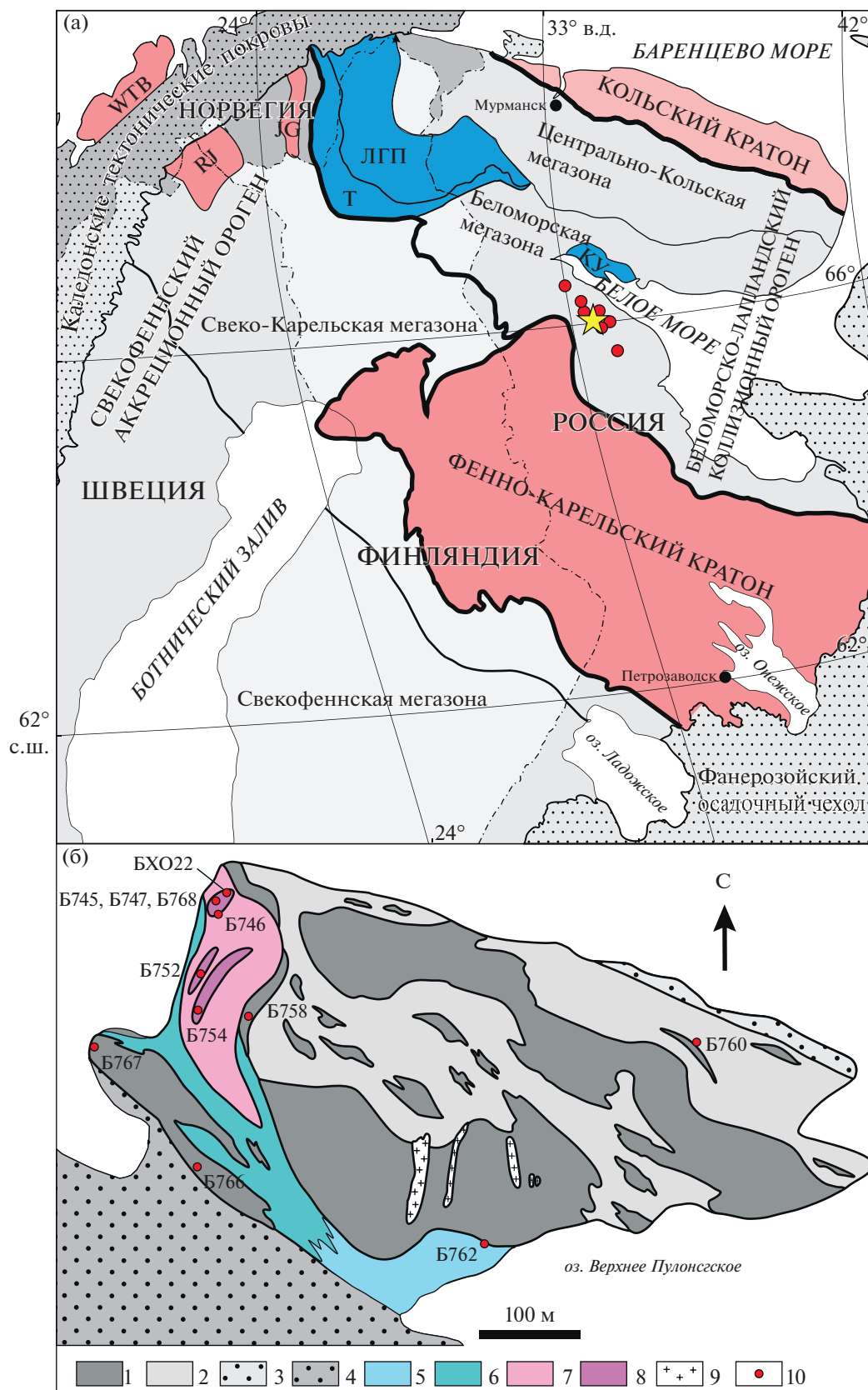


Рис. 1. (а) Положение объекта исследования на схеме главных тектонических единиц Фенноскандинавского щита (Bushmin, Glebovitsky, 2016, с уточнениями). Красные кружки — месторождения коллекционного корунда, в том числе Хитостров (желтая звезда). ЛГП — Лапландский гранулитовый пояс, Т — пояс Тана, КУ — Колвица-Умбинский фрагмент ЛГП. WTB — West Troms Basement complex, RJ — Rastojaure complex, JG — Jergul complex: архейские анклавы Фенно-Карельского кратона (реликты архейской коры), встречающиеся в Свеко-Карельской мегазоне Свекофеннского орогена. На рис. 1а крап, независимо от цвета фона, обозначает фанерозойские образования.

(б) Схема геологического строения восточной части острова Хитостров. Составлена с использованием данных (Глазунков, 1985). 1 — *Grt* амфиболиты; 2 — *Bt* и *Grt-Bt* плагиогнейсы; 3 — *Ky-Grt-Bt* плагиогнейсы; 4 — *Ky-Grt-Bt* плагиогнейсы с прослоями *Grt-Bt* плагиогнейсов, редкими прослоями *Amp-Bt* гнейсов и будинированными полосами амфиболитов; 5 — $\pm$ *Ky-Grt-Bt* плагиогнейсы с участками пониженного содержания *Qz*, с зонами и жилородными телами гнейсовидных полосчатых бескварцевых *Pl* пород с *Grt*, *Bt*, *Ky* и жилами плагиоклазитов (обогащение *Ky* в оторочках); 6 — гнейсовидные полосчатые бескварцевые *Pl* породы (с *Bt*, *Grt*, *Ky*) с жилами плагиоклазитов и зонами, обогащенными *Ky*, содержат реликтовые участки $\pm$ *Ky-Grt-Bt* плагиогнейсов; 7 — корундсодержащие породы (главные минералы *Pl*, *Ca-Amp*, *Bt*, *Grt*, $\pm$ *Ky*); 8 — участки обогащенные корундом; 9 — пегматоидные граниты; 10 — места отбора образцов.

описаны Н.С. Серебряковым (2004). Им была установлена крупномасштабная (десяtkи м) минеральная метасоматическая зональность, которая объединяла *Crn*-содержащие породы не только с *Pl*, *Bt*, *Grt*, *Ky*, но и породы, содержащие большое количество *Ca-Amp*. В дальнейшем эта зональность Н.С. Серебрякова была принята в основу моделирования метасоматического процесса для обоснования образования *Crn*-пород, в том числе и богатых *Ca-Amp* по гнейсовому протолиту (Акимов, Кольцов, 2022).

Новые данные по минеральной зональности, полученные нами в процессе детального изучения разведочных канав, позволили исключить *Amp*-содержащие породы из зональности, образованной по гнейсам, и рассматривать окружающие *Qz*-содержащие амфиболиты в качестве их протолита. При переходах между зонами плагиоклазовых пород с *Ca-Amp* и без него всегда отмечаются резкие различия этих пород по составу, текстуре, структуре, зернистости, а также присутствию фрагментов десилицированных амфиболитов в породах с *Ca-Amp*.

***Crn*-содержащие породы по амфиболитам**

Crn-содержащие породы с *Ca-Amp* на Хитострове преобладают над таковыми без *Ca-Amp* и представлены всеми разновидностями: от плагиоклазитов и лейкократовых пород до мафических пород, хотя сложены относительно постоянным сочетанием главных минералов (*Pl*, *Grt*, *Ca-Amp*, $\pm$ *Bt*). Это средне-крупнозернистые, гнейсовидные или почти массивные породы с текстурой, которую можно называть и однородной, и пятнисто-прожилковой, и прожилково-полосчатой, и линзовидно-полосчатой (рис. 2 и 3).

Переходы между ними, может быть, за исключением меланократовых и мафических пород, постепенные и определяют степень пропитки плагиоклазом более меланократовой матрицы, в которой плагиоклаз первоначально распределялся относительно равномерно между зернами темноцветных минералов (пропитка плагиоклазом по всему объему). Поэтому такие лейкократовые

и мезократовые породы иногда выглядят как относительно однородные “бескварцевые гнейсы”. В таких относительно однородных породах плагиоклаз, возможно, следующей генерации, сначала появляется в виде небольших пятен, тонких прожилков, которые бывают прямолинейными или соединяясь, образуют прожилковую сетку, укрупняются в линзовидные плагиоклазовые участки, полосы и зоны, содержащие или не содержащие темноцветные минералы матрицы породы. Темноцветные минералы, в свою очередь, могут образовывать более меланократовые и мафические участки, пятна, полосы и зоны, преимущественно состоящие из *Ca-Amp*, *Grt*, $\pm$ *Bt*.

Таким образом, часто бывает трудно отделить плагиоклаз в любой морфологической форме его проявления, включая жилки и жилы, линзовидные и жилородные полосы, от матрицы породы. Все выглядит как одна порода, в разной степени пропитанная *Pl*-материалом. Жилки могут представлять каналы, по которым просачивался метасоматизирующий флюид, а полосы плагиоклаза представлять внутренние жилородные зоны мета-

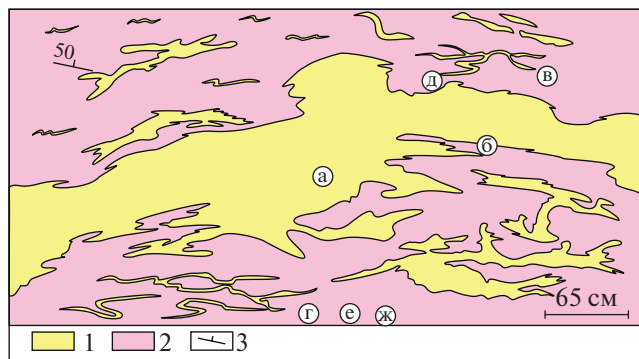


Рис. 2. Зарисовка стенки канавы. Взаимоотношения корундсодержащих пород (главные минералы *Pl*, *Ca-Amp*, *Bt*, *Grt*) с жилами плагиоклазитов. Буквы в кружках соответствуют фотографиям образцов пород с корундом на рис. 3. 1 — жилы плагиоклазитов (*Pl* $\geq$ 75%), 2 — пятнисто-прожилковые и линзовидно-полосчатые корундсодержащие породы с разным содержанием плагиоклаза, 3 — гнейсовидность и полосчатость.

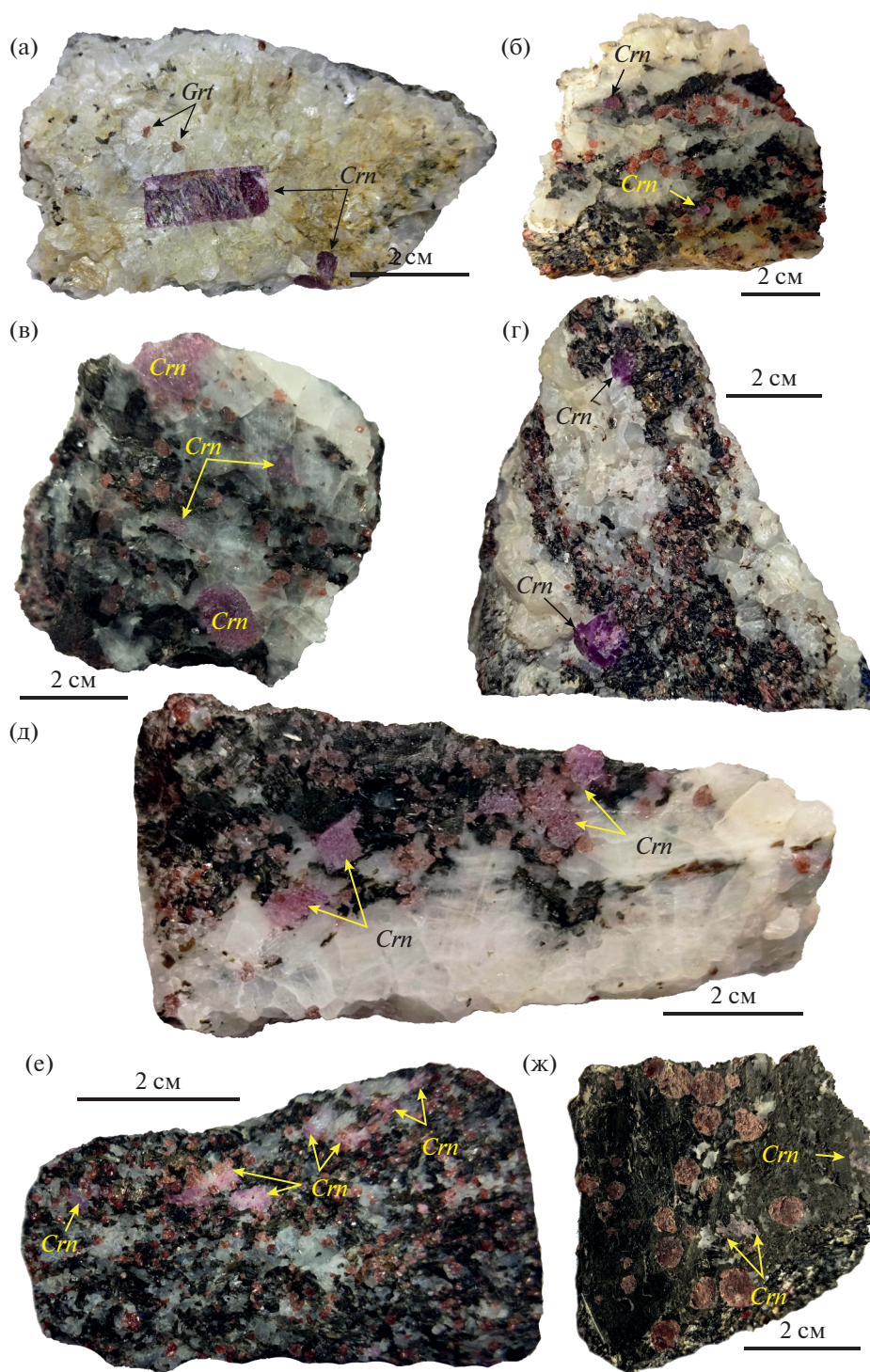


Рис. 3. Фотографии корундсодержащих пород с *Pl*, *Ca-Amp*, *Bt*, *Grt*, $\pm$ *Ged*, *St* разных минеральных типов в местах отбора образцов на рис. 2. Корунд присутствует во всех минеральных типах породы. Типы породы по относительному содержанию в них *Pl*: мафические ($Pl \leq 25\%$), меланократовые ($Pl \sim 25-40\%$), мезократовые ($Pl \sim 40-60\%$) и лейкократовые ($Pl \sim 60-75\%$), жилы плагиоклазитов ($Pl \geq 75\%$). (а) *Crn* в жиле плагиоклазита и мезократовой породы, (б) *Crn* в лейкократовой зоне контакта жилы плагиоклазита и мезократовой породы, (в) и (г) *Crn* на контактах *Pl*-жил в мезократовой и меланократовой породах, (д) много *Crn* на контакте *Pl*-жилы с меланократовой породой, (е) *Crn* в *Pl*-пятнах матрицы мезократовой породы, (ж) *Crn* в *Pl*-пятнах матрицы мафической породы.

соматической зональности. По нашим наблюдениям, корунд встречается во всех без исключения минеральных типах пород от лейкократовых до мафических, везде, куда проникло *Pl*-вещество (рис. 2 и 3). Все отмеченные петрографические особенности пород мы интерпретируем как метасоматическую зональность.

Жилки и жилы плагиоклазитов (мощностью см, десятки см) почти мономинеральные или содержащие главные минералы матрицы, без корунда или с корундом, который присутствует и внутри жил и на контактах, нередко отличается от жилок или жилородных полос плагиоклазита с заметным присутствием граната в ассоциации с корундом. В таких жилородных полосах содержание граната нередко сопоставимо с содержанием плагиоклаза. В породах они могут присутствовать в масштабе образцов одновременно с анхимономинеральными плагиоклазовыми жилами, отделяясь друг от друга более меланократовыми минеральными ассоциациями. Нередко они ассоциируют с анхимономинеральными плагиоклазовыми жилами, контактируя с ними с двух сторон или в местах их выклинивания, и поэтому мы считаем такие маломинеральные плагиоклазовые породы внутренними зонами метасоматической зональности (рис. 4). Гранат-плагиоклазовые и плагиоклаз-гранатовые жилородные зоны могут сменяться зонами плагиоклазового состава с большим числом минералов (*Pl*, *Ca-Amp*, *Grt*) и (*Pl*, *Ca-Amp*, *Bt*, *Grt*), которые мы рассматриваем как промежуточные зоны. Эти зоны в масштабе образцов и в масштабе стенок разведочных канав могут контактировать с участками или зонами бескварцевых мафических или меланократовых амфиболитов с *Pl*, *Grt*, $\pm Bt$ (рис. 4), которые мы интерпретируем как “десилицированные амфиболиты”, представляющие собой внешние зоны метасоматической зональности по кварцевым амфиболитам. Заканчивая описание признаков минеральной метасоматической зональности, показанной в масштабе наиболее типичных образцов на рис. 4, обратим внимание на повторяющуюся **обобщенную** триаду минеральных зон: *внешняя* мафическая или меланократовая зона десилицированного амфиболита, *промежуточная* зона мезократовых и лейкократовых плагиоклазовых пород с корундом, *Ca-амфиболом*, гранатом, $\pm Bt$ и *внутренняя* зона плагиоклазита с корундом и с небольшим количеством биотита и граната.

ТЕРМОБАРОМЕТРИЯ

Для оценки *P-T* условий нами был выбран метод мультиравновесной термобарометрии с оценкой степени неравновесности минеральной ассоциации *avPT* (Powell, Holland, 1994), реализованный в программе THERMOCALC с современными базами термодинамических данных для метаморфиче-

ских пород версии 3.40 (ds622) (Powell, Holland, 1988; Holland, Powell, 1998). Преимуществами этого метода для целей нашего исследования являлось присутствие в базе данных описания ставролитового твердого раствора и возможность реалистичной оценки погрешности *P-T* определения. Она учитывает статистические ошибки аналитических данных, неточность описаний моделей твердых растворов и погрешность термодинамических величин чистых веществ в базе данных. При этом максимальная погрешность связана с неточностью описаний моделей твердых растворов и с отклонением реальных составов минералов от равновесных.

Погрешность *P-T* оценок методом *avPT* определяется параметрами, рассчитываемыми программными средствами (Powell, Holland 1994): два **sd** (стандартные отклонения по температуре и по давлению) и **cor** (коэффициент корреляции), определяющие размеры и форму эллипса погрешностей (его сжатие и наклон), а также **sigmafit** (**fit**). Если первые два параметра (размер и форма эллипса погрешностей) являются слабо изменяемыми характеристиками для системы уравнений реакций, то параметр **fit** характеризует степень согласования трех и более линейно независимых реакций. Этот параметр позволяет оценить, насколько данные составы минералов оказываются далекими от равновесия с точки зрения используемой термодинамической модели в терминах величин активности компонентов.

В идеальном случае на *P-T* плоскости все реакции (равновесия) должны пересечься в одной точке (пучок линий), которая, при данном составе равновесных минералов, будет соответствовать искомым *P* и *T*, в этом случае параметр **fit** будет равен 0. В случае отклонения от равновесия (возрастание параметра **fit** к 1.0 и выше) возникает рассогласование линий реакций с образованием облака их парных (тройных и т.д., в зависимости от числа линейно зависимых реакций) пересечений, при этом параметр **fit** прямо пропорционален степени этого рассогласования.

Возможности метода *avPT* существенно расширены в использованных нами программах TSC-Comb (версия 1.1) и TriQuick (Доливо-Добровольский, 2012, 2013). В них применен комбинаторный подход к решению проблемы поиска равновесных составов при наличии большого количества аналитических данных, а также визуализация результатов вычислений на *P-T* диаграммах.

Для определения максимальных *P-T* параметров при формировании минеральной метасоматической зональности и их применения при моделировании выбраны образцы *Crm*-содержащих пород с минеральной ассоциацией *Pl + Grt + Bt + Ca-Amp* (рис. 5), не содержащих ставролит или содержащих единичные зерна *St*, и без видимых признаков на-

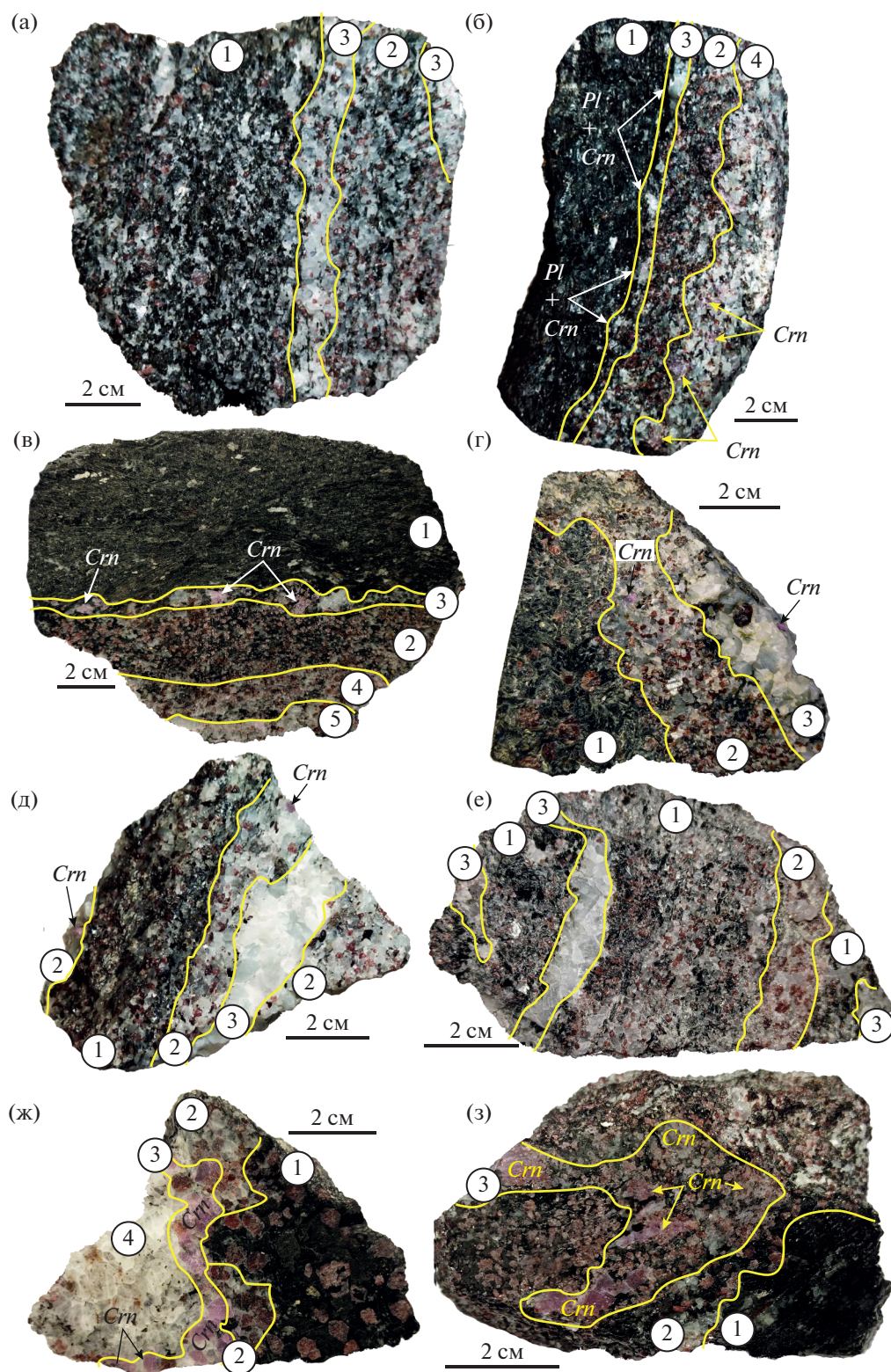


Рис. 4. Наблюдаемая в масштабе образцов минеральная метасоматическая зональность в *Bt–Grt–Ca–Amp–Pl* породах, содержащих и не содержащих корунд. Цифрами в кружках обозначены номера зон. (а) обр. БХО22, *Crn* нет во всех трех зонах (*BtGrtAmpPl*), отличающихся степенью пропитки плагиоклазом; (б) обр. БХО22 (*BtGrtAmpPl*), *Crn* нет в мафической зоне-1 и в меланократовой зоне-2, но *Crn* есть в *Pl*-пятнах более лейкократовой зоны-3 и в еще более пропитанной *Pl* зоне-4; (в) обр. БХО22 (*BtGrtAmpPl*), *Crn* нет в мафической зоне-1 и в богатой *Grt* меланократовой зоне-2, но *Crn* есть в богатой *Pl*-пятнами зоне-3 и в мезократовой и лейкократовой зонах-4 и -5; (г) обр. Б745-10, *Crn* нет в мафической зоне-1 (*AmpGrtBtPl*), но мелкий *Crn* ~ 1 мм есть в мезократовой–лейкократовой, богатой *Pl*, зоне-2 (*PlGrtAmp ± Bt*) и *Crn* ~ 5–8 мм в $\pm$ *Bt–Grt* плагиоклазите зоны-3; (д) обр. Б745-10, *Crn* есть во всех трех зонах: мезократовой зоне-1 (*PlAmpBtGrt*) с редким *Crn* в *Pl*-пятнах, лейкократовой зоне-2 (*PlBtGrt*) с редким *Crn* 1–3 мм и зоне-3 $\pm$ *Bt–Grt* плагиоклазита с единичными зернами *Crn* ~ 2–3 мм; (е) обр. Б745, *Crn* нет в *Pl*-жилках зоны-3, но мелкий *Crn* есть в мезократовой зоне-1 (*GrtPlAmpBt*) и много *Crn* ~ 2–3 мм в *Crn–Grt* плагиоклазите $\pm$ *Bt* зоны-2; (ж) обр. Б745-10, *Crn* нет в мафической зоне-1 (*AmpGrtBtPl*), но *Crn* есть в мезократовой зоне-2 (*PlGrtAmp*), много *Crn* ~ 5–10 мм в *Grt–Crn* плагиоклазите зоны-3 и есть *Crn* в плагиоклазите с *Bt* и *Grt* зоны-4; (з) обр. Б745-17, *Crn* нет в мафической зоне-1 (*AmpBtPl*), но редкий *Crn* ~ 5–8 мм есть в меланократовой зоне-2 (*AmpGrtBtPl*) и много *Crn* в мезократовой зоне-3.

ложенных низкотемпературных изменений. Выбирались участки шлифа размером 5–10 мм, в пределах которых предполагалось наиболее вероятным локальное равновесие между зернами сосуществующих контактирующих или близко расположенных минералов (*Grt*, *Pl*, *Amp*, *Bt*, *Ilm*, *Rt*). Наилучшие и согласующиеся между собой оценки *P–T* удалось получить в двух зональных образцах *Crn*-содержащих пород.

В первом обр. Б745-10, содержащем корунд 3–8 мм и единичные зерна ставролита, анализировалась мезократовая пятнистая зона: *Pl* (40–60%), *Grt* (20–30%), *Amp* (10–20%), *Bt* (10–15%), *Crn* (1–10%), *St* (редкие единичные зерна), *Ap*, *Ilm*, *Rt* (1–5%). Она расположена между жилой плагиоклазита (*Pl* > 75%) и зоной мафической гранатамфиболовой породы (*Pl* < 25%). Мезократовая *Bt–Amp–Grt–Pl* порода представлена на рис. 4 фотографиями зонального обр. Б745-10: (г) – зона-2, (д) – зона-1, (ж) – зона-2. Эта порода также сходна по составу с обр. Б745 ((е) – зона-1) и обр. Б745-17 ((з) – зона-3).

В этой очень неравномерно зернистой, средне-крупнозернистой пятнистой породе между лейкократовыми существенно плагиоклазовыми участками с *Ca–Amp*, *Bt*, *Grt* и *Crn* хаотично присутствуют меланократовые пятна, в которых преобладают *Ca–Amp*, *Bt*, *Grt*. В меланократовых пятнах может присутствовать *Crn* с *Grt* или *St* с *Grt* внутри и/или рядом с плагиоклазом. Для целей термобарометрии подходили только меланократовые пятна, так как только в них можно было исследовать контакты всех ассоциирующих минералов.

В исследованных локальных участках амфибол-биотит-гранат-плагиоклазовой породы были обнаружены небольшие вариации состава сосуществующих минералов: *Ca*-амфибол ($X_{Mg}^2 = 0.57–0.60$, $Al = 3.2–3.5$ форм. ед., $Na = 0.77–0.98$ форм. ед.); плагиоклаз (23–33% *An*); биотит ($X_{Mg} = 0.69–0.73$, $Ti = 0.09–0.14$ форм. ед.); гранат до 6–7 мм (*Alm* 56–62%, *Prp* 25–32%, *Grs* 6–16%,

Sps 0–1%); ставролит ($X_{Mg} = 0.29–0.34$). Для рутила, также находящегося в контакте с гранатом, использован его формульный состав из базы компонентов THERMOCALC.

Наилучшие *P–T* оценки в этом образце получены по микросондовым анализам краевой части зерна граната (~4 мм) и амфибола, плагиоклаза, ильменита на контакте с гранатом (табл. 1). Получены пучки с четырьмя линейно независимыми реакциями и хорошими критериями погрешностей (рис. 5а). Обращает на себя внимание, что добавление в расчет присутствующих в породе корунда и ставролита обнаруживает отсутствие их равновесия с другими минералами породы (рис. 5б, 5в).

Второй обр. Б745-24, содержащий корунд 1–2 мм и не содержащий ставролит, представляет мафическую крупнозернистую плагиоклаз-гранат-биотит-амфиболовую породу (*Pl* < 25%) с полосами и участками 0.5–1 см мономинерального биотитового состава (слюдита). Для целей термобарометрии анализировалась четырехминеральная порода: *Pl* (5–10%), *Grt* (5–15%), *Bt* (20–30%), *Amp* (30–45%), *Ap*, *Ilm*, *Rt* (~5%), *Crn* ($\leq 1\%$). Такая мафическая порода сходна по минеральному составу с породами на рис. 4: обр. БХО22 ((б) – зона-1), обр. БХО22 ((в) – зона-1), обр. Б745-10 ((г) – зона-1), обр. Б745-10 ((ж) – зона-1) и обр. Б745-17 ((з) – зона-1).

В минералах исследованных локальных участков обнаружены вариации состава сосуществующих минералов: *Ca*-амфибол ($X_{Mg} = 0.59–0.61$, $Al = 3.3–4.2$ форм. ед., $Na = 0.82–0.95$ форм. ед.); биотит ($X_{Mg} = 0.70–0.73$, $Ti = 0.08–0.12$ форм. ед.), порфиروبласты граната 5–10 мм (*Alm* 58–67%, *Prp* 15–29%, *Grs* 13–19%, *Sps* 0–1%); плагиоклаз в пятнах и ветвящихся прожилках (27–39% *An*); корунд 1–2 мм в пятнах плагиоклаза и корунд (≤ 1 мм) на границе плагиоклаза с гранатом; на контакте биотита с более основным плагиоклазом присутствуют каймы альбита (1% *An*). Для рутила, также находящегося в контакте с гранатом, использован его формульный состав из базы компонентов THERMOCALC.

² Обозначения особенностей химического состава минералов: для амфибола, биотита, ставролита: $X_{Mg} = Mg/(Mg + Fe)$.

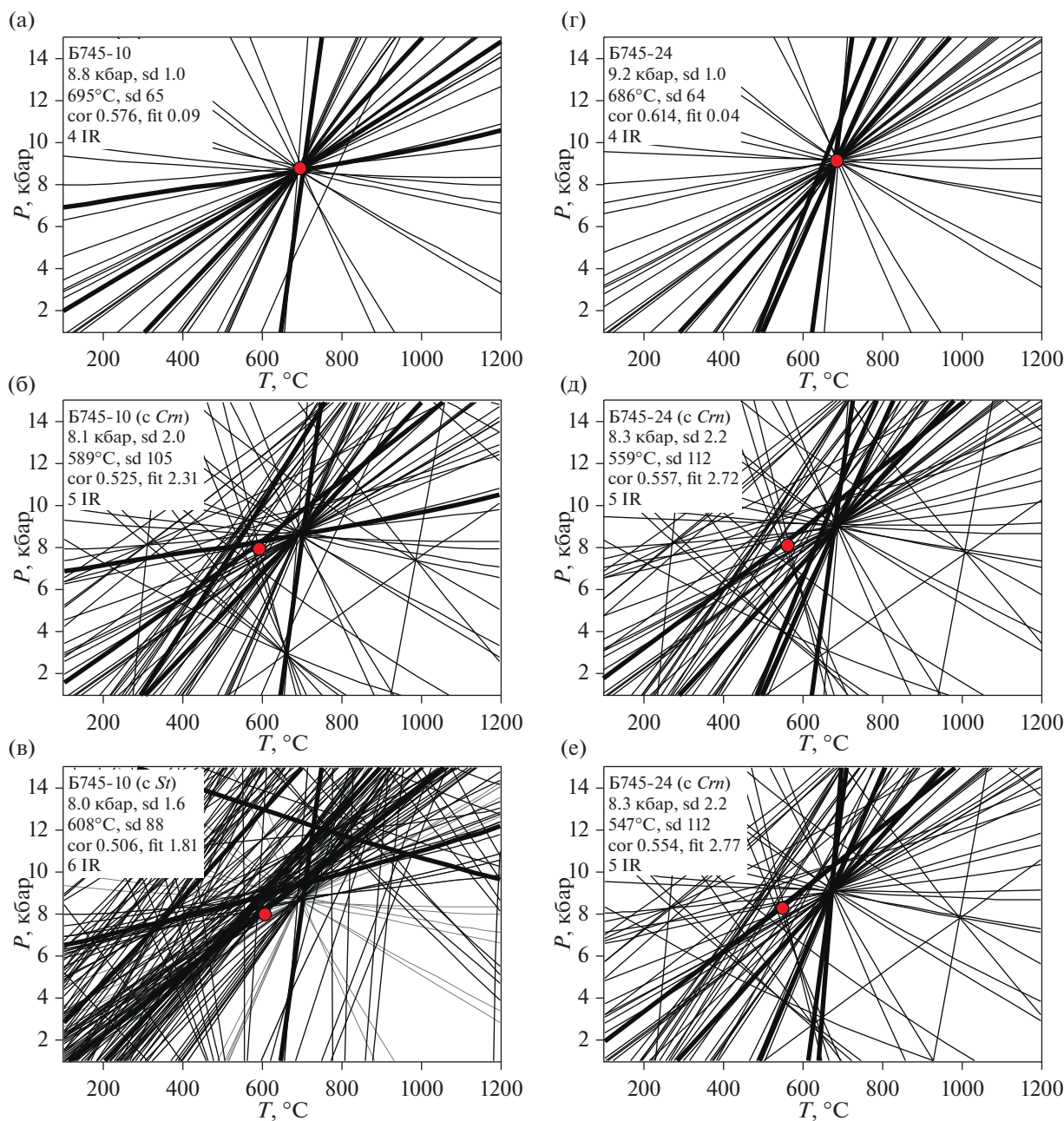


Рис. 5. Примеры расчета методом *avPT* в программе THERMOCALC *P-T* параметров *Crn*-содержащих метасоматических пород месторождения Хитостров. (а), (б), (в) — обр. Б745-10: (а) расчет для ассоциации $Pl + Grt + Amp + Bt + Ilm + Rt$, (б) расчет для ассоциации $Pl + Grt + Amp + Bt + Ilm + Rt$ с добавлением *Crn* (присутствует в *Pl* пятнах матрицы), (в) расчет для ассоциации $Pl + Grt + Amp + Bt + Ilm + Rt$ с добавлением *St* (присутствует в матрице); (г), (д), (е) — обр. Б745-24: (г) расчет для ассоциации $Pl + Grt + Amp + Bt + Ilm + Rt$, (д) расчет для ассоциации $Pl + Grt + Amp + Bt + Ilm + Rt$ с добавлением *Crn* (присутствует в *Pl* пятнах матрицы), (е) расчет для ассоциации $Pl + Grt + Amp + Bt + Ilm + Rt$ с добавлением *Crn* (присутствует на контакте с плагиоклазитом). IR — число независимых реакций.

Наилучшие оценки *P-T* в этом образце получены по микронзондовым анализам краевой части зерна граната (~10 мм), амфибола, биотита, ильменита на контакте с гранатом и плагиоклаза (табл. 1). Получены пучки с четырьмя линейно независимыми реакциями и хорошими критериями погрешностей (рис. 5г). Так же, как и в случае

расчетов для обр. Б745-10, добавление в расчет присутствующего в породе корунда, ассоциирующего с плагиоклазом, обнаруживает отсутствие его равновесия с другими минералами породы (рис. 5д).

Таким образом, *P-T* параметры исследованных пород, принадлежащих к разным зонам минераль-

Таблица 1. Химические анализы минералов *Crn*-содержащих пород Хитострова, по которым рассчитывались *P-T* параметры (рис. 5)

Компо- ненты	Б745-10*	Б745-10	Б745-10	Б745-10	Б745-10	Б745-10	Б745-24	Б745-24	Б745-24	Б745-24	Б745-24
	<i>Grt</i>	<i>Bt</i>	<i>Pl</i>	<i>Amp</i>	<i>Ilm</i>	<i>St</i>	<i>Amp</i>	<i>Pl</i>	<i>Bt</i>	<i>Grt</i>	<i>Ilm</i>
	104**	113	117	118	128	146	7	23	32	37	38
SiO ₂	38.51	38.65	61.16	41.87	0.00	26.18	42.03	61.93	36.31	37.86	0.00
TiO ₂	0.00	2.23	0.00	1.05	53.54	1.09	1.12	0.00	1.79	0.00	54.17
Al ₂ O ₃	21.68	21.02	24.26	19.78	0.00	54.64	19.43	23.64	19.50	21.34	0.00
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.27	0.00	0.27	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	27.98	12.52	0.00	12.60	44.77	11.86	12.33	0.00	11.77	27.80	43.99
MnO	0.42	0.00	0.00	0.09	0.79	0.19	0.07	0.00	0.03	0.24	0.32
MgO	7.81	16.31	0.00	10.88	0.89	3.71	11.08	0.00	15.25	7.27	1.53
CaO	3.60	0.00	5.91	10.03	0.00	0.00	10.33	5.79	0.00	4.49	0.00
Na ₂ O	0.00	1.56	8.67	3.21	0.00	0.00	3.10	8.47	1.51	0.00	0.00
K ₂ O	0.00	8.33	0.00	0.23	0.00	0.00	0.32	0.17	7.95	0.00	0.00
ZnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Сумма	100.00	100.62	100.00	100.01	99.99	98.79	100.01	100.00	94.11	99.00	100.01
<i>X</i> _{Mg}		0.70		0.60		0.34	0.61		0.70		
<i>Alm</i>	0.60									0.59	
<i>Sps</i>	0.01									0.01	
<i>Prp</i>	0.30									0.28	
<i>Grs</i>	0.10									0.12	
<i>An</i>			0.27					0.27			

Примечание. Определение химического состава минералов проводилось в ИГГД РАН с помощью электронного микроскопа JEOL JSM-6510LA с ЭДС приставкой JED 2200. Аналитик О.Л. Галанкина.

* Номер образца, ** точка анализа.

ной метасоматической зональности (рис. 4), сосредоточены в интервале давлений 8.8–9.2 кбар и температур 695–710°C. Отметим, что значения *P* и *T*, полученные в расчетах с корундом и ставролитом и показанные на рис. 5, являются фиктивными, отражающими стягивание программными средствами неравновесных реакций между минералами в точку их условного пересечения, и приведены в качестве свидетельств отсутствия равновесия корунда и ставролита с *Pl*, *Grt*, *Bt* и *Ca-Amp*.

Предшествующими исследованиями методами классической минеральной термометрии (Серебряков, Аристов, 2004; Серебряков, 2004) были оценены температурные условия начала образования аналогичных пород Хитострова в диапазоне 650–700°C. *P-T* параметры, полученные нами, близки к оценкам *P-T* условий образования *Crn*-содержащих пород (*T* не менее 720°C и *P* не ниже 10 кбар), полученным методом минимизации термодинамического потенциала минеральной системы с помощью программного комплекса “Селектор” (Авченко и др., 2007).

МОДЕЛЬНАЯ МЕТАСОМАТИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ

Методика моделирования

Задачей численного моделирования являлось выяснение вопроса — может ли предлагаемая модель взаимодействия флюид–порода привести к образованию описанной выше метасоматической зональности, установленной геологическими методами. Моделирование проведено с применением программного комплекса HCh (Шваров, 1999). Использована база термодинамических констант минералов (Holland, Powell, 1998), модели твердых растворов: плагиоклаза — субрегулярная (Аранович, 1991), других минералов — многопозиционная идеальная. Константы частиц солевого раствора взяты из (Sverjensky et al., 1991, 1997; Pokrovskii, Helgeson, 1995; Shock et al., 1997). В качестве исходного кварцевого амфиболита принят средний состав амфиболитов, окружающих тело корунд-содержащих пород, рассчитанный по образцам Б760-2, Б760-3, Б760-4, Б762-1, Б762-5, Б766, Б767 (табл. 2). В основу численной модели положен сценарий процесса, когда через толщу амфиболитов

просачивался поток флюида, который формировал тела плагиоклазитов (рис. 1, 2) и в дальнейшем взаимодействовал с этим амфиболитом вплоть до уравнивания с ним. Поскольку источник и состав этого флюида оставался неизвестным, в качестве исходного для моделирования взаимодействия с амфиболитом принят флюид, равновесный с жилой плагиоклазита.

Состав исходного флюида получен путем уравнивания 1 кг раствора 1M NaCl + 5M CO₂ + 0.02M CH₄ с 10 кг плагиоклазитовой жилы, состоящей из 90% плагиоклаза ($X_{An} = 0.15$), 8% корунда, 1% биотита, 1% граната. При таком соотношении количества флюида и породы (1 : 10) ее растворение и обмен Ca и Na между плагиоклазом и флюидом практически не искажает состав исходного плагиоклазита. Выбор состава первоначального раствора, являющегося гомогенным (Иванов, Бушмин, 2021), сделан исходя из широкого распространения хлоридных водно-углекислотных флюидов в коре. Конкретные концентрации компонентов в этом первоначальном растворе существенного значения для результатов расчетов не имеют, так как реальный баланс всех частиц раствора складывается уже после его взаимодействия с плагиоклазитом. Добавка CH₄ введена, чтобы избежать образования магнетита, отсутствующего в породах. Для всего процесса взаимодействия приняты $T = 700^\circ\text{C}$ и $P = 9$ кбар, в соответствии с приведенными выше P - T параметрами (рис. 5). Для исходного плагиоклазита, учитывая его образование под воздействием внешнего флюидного потока, принята несколько более высокая $T = 710^\circ\text{C}$ при том же $P = 9$ кбар.

Использована методика проточного ступенчатого реактора (Шваров, 1999; Grichuk, 2012), при которой исходный флюид пропусклся однократно и последовательно через ряд ячеек с номерами от 1 до 11, содержащих возрастающее количество исходного амфиболита, его состав приведен в табл. 3 в пересчете на сухое вещество. В каждой из ячеек рассчитывалось равновесие флюида с заданным количеством амфиболита. Состав флюида и породы изменялся при перемещении флюида из одной ячейки в другую. Этот одноволновой ступенчатый реактор отличается от часто используемого многоволнового реактора тем, что высокие значения отношения флюид/порода, характерные для интенсивного метасоматического процесса, достигаются не увеличением числа волн, а уменьшением массы породы от последней к первой ячейке. Преимуществом одноволнового реактора является возможность получения наиболее полной информации о составе системы, в частности об активности частиц в растворе, и о процентном содержании минералов в системе.

Первичные значения массы породы в ячейках ($M_{исх}$) заданы от 0.029 г в ячейке 1 до 9242 г в ячейке

с исходным амфиболитом (табл. 3), масса флюида в волне 1 кг. Исходя из этих величин и плотности амфиболита и воды при заданных P - T параметрах (3.0 и 0.91 г/см³, соответственно), рассчитана величина интегрального объемного отношения флюид/порода W . Она определяется как отношение объема флюида, прошедшего через данную ячейку, к объему породы, через которую флюид прошел в этой и всех предыдущих ячейках (табл. 3).

В первой ячейке с максимальным значением W устанавливается режим открытых систем с ВПК (Коржинский, 1949, 1982), при котором состав породы полностью определяется составом флюида. В последней ячейке без номера (исходный амфиболит) с минимальным W все компоненты инертны (Коржинский, 1949, 1982) и состав флюида контролируется составом амфиболита. В промежуточных ячейках при прохождении флюида через них формируются минеральные ассоциации, которые по мере изменения W образуют модельную метасоматическую зональность (табл. 3).

Предварительные расчеты показали, что при постоянных P и T корунд в продуктах изменения амфиболита не образуется. В связи с этим в первой ячейке принято понижение температуры от 710 до 700°C. Это отражает первоначальное охлаждение нагретого флюида, втекающего в несколько менее нагретые породы. В масштабах наблюдаемой зональности (рис. 2 и 4) при переносе тепла флюидом температура быстро выравнивается и может быть принята постоянной во всех остальных ячейках (Кольцов, Бушмин, 2022).

Кроме химического, минерального состава полученных модельных пород, их начального и конечного количества и величины W , в табл. 3 приведены характеристики флюида: $\lg a_{\text{SiO}_2}$, pH, A_R ($R = \text{Na, K, Ca, Mg, Fe}$). Последний параметр рассчитывается как $A_R = \lg \left(a_{R^{n+}} / a_{\text{H}^+}^n \right) + \frac{n}{2} \lg a_{\text{H}_2\text{O}}$ и является эквивалентом химических потенциалов оксидов в породе и равновесном с ней растворе (Кольцов, 2015). Наиболее информативной в данном случае является величина отклонения указанных параметров от таковых исходного амфиболита, обозначенных надстрочным индексом ⁽⁰⁾ при тех же P , T : $\Delta \lg a_{\text{SiO}_2}$, ΔpH , ΔA_R . Знак и величина ΔA_R характеризуют смещение равновесий гидролиза минералов с участием соответствующего катиона $M + n\text{H}^+ = N + R^{n+} + n/2\text{H}_2\text{O}$ вправо, если $\Delta A_R < 0$ (кислотный метасоматоз, дебазификация), или влево, если $\Delta A_R > 0$ (щелочной метасоматоз, базификация) (Кольцов, 2015).

Результаты моделирования

Под воздействием на амфиболит флюидного потока, первоначально равновесного с плагио-

Таблица 2. Химические составы пород месторождения Хитостров, места отбора образцов на рис. 16

Номер образца	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	K ₂ O	MgO	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	S	П.п.п.	Сумма + П.п.п.
Амфиболиты (<i>Qz-Grt-Pl-Ca-Amp</i>)													
Амфиболиты вблизи контакта с телом <i>Crn</i> -содержащих пород													
B758-1	46.94	19.27	12.12	0.99	13.16	0.80	4.49	0.42	0.57	0.06	0.00	0.73	99.55
B758-2	55.47	16.44	8.36	1.59	10.53	0.70	4.64	0.13	0.66	0.05	0.00	1.04	99.61
Линза амфиболитов в $\pm$ <i>Grt-Qz-Bt-Pl</i> гнейсе													
B760-2	49.79	12.46	16.76	0.91	10.21	0.87	5.10	0.27	2.30	0.18	0.04	0.87	99.76
B760-3	50.73	12.77	16.75	0.55	9.84	1.01	5.23	0.24	2.19	0.18	0.00	0.21	99.70
B760-4	49.77	12.23	17.70	0.42	9.85	1.12	5.35	0.23	2.31	0.18	0.02	0.38	99.56
Тело амфиболитов (в нем обнаружено обогащение изотопом ¹⁶ O, Bindeman, Serebryakov, 2011)													
B766	47.32	14.13	16.93	1.56	11.09	0.65	4.53	0.23	3.03	0.24	0.00	−0.39	99.71
B767	50.03	12.34	19.16	0.72	9.38	0.55	4.84	0.27	2.26	0.18	0.01	−0.34	99.74
Амфиболиты на контакте с десилицированными гнейсами													
B762-1	47.12	12.24	18.46	1.60	10.49	0.69	6.21	0.24	2.27	0.11	0.01	0.13	99.57
B762-5	46.67	14.15	22.40	0.05	10.03	0.10	2.57	0.36	2.75	0.53	0.00	−0.50	99.61
Мафические $\pm$ <i>Bt-Pl-Grt-Ca-Amp</i> породы без <i>Crn</i> среди пород с <i>Crn</i> (десилицированные амфиболиты)													
B745-18	37.53	19.03	19.34	1.92	6.08	0.43	11.03	0.17	3.15	0.01	0.00	0.92	99.61
B745-19	38.29	19.11	17.99	2.31	7.21	0.37	10.80	0.14	2.52	0.01	0.00	0.80	99.55
B752-6	37.55	19.37	21.00	1.43	5.45	1.27	10.77	0.15	1.97	0.01	0.00	0.55	99.52
B752-7	36.65	19.20	19.65	1.33	4.05	2.21	11.76	0.14	3.12	0.01	0.01	1.28	99.41
B754-1	37.84	19.52	19.38	2.61	7.49	0.29	9.37	0.12	2.41	0.14	0.00	0.38	99.55
B768-40	36.71	19.05	16.22	2.06	6.71	1.79	12.14	0.13	1.76	1.14	0.00	1.84	99.55
B768-42	40.52	18.49	17.50	3.12	7.15	0.42	9.10	0.12	2.62	0.01	0.00	0.41	99.46
B768-44	36.31	19.72	13.98	2.16	4.70	2.57	13.82	0.06	2.22	1.05	0.00	2.80	99.39
Пятнисто-полосчатые <i>Crn</i> -содержащие породы с <i>Ca-Amp</i> (<i>Pl-Amp-Grt-Bt-Crn</i> $\pm$ <i>St</i>)													
B745-7	44.31	26.65	11.66	4.65	4.84	0.34	5.22	0.11	1.15	0.03	0.01	0.61	99.58
B746-1b	42.80	27.37	12.65	4.11	4.83	0.41	5.51	0.11	1.53	0.02	0.00	0.44	99.78
B768-5	44.52	26.27	11.56	4.53	5.23	0.27	5.35	0.07	1.22	0.02	0.00	0.49	99.53
B768-8	45.55	23.14	12.39	4.94	5.55	0.35	5.59	0.10	1.46	0.02	0.00	0.42	99.51
B768-9	43.29	29.07	8.73	5.10	5.11	0.34	5.28	0.06	1.17	0.16	0.01	1.41	99.73
B768-10	48.71	24.86	7.60	6.17	4.80	0.24	4.27	0.04	1.08	0.25	0.00	1.64	99.66
B768-11	41.76	30.83	8.96	4.12	4.77	0.42	5.82	0.06	1.57	0.02	0.00	1.30	99.63
B768-12	41.48	26.20	12.57	3.60	5.48	0.51	7.11	0.10	1.66	0.01	0.00	0.85	99.57
B768-18	45.29	23.89	12.24	4.25	5.42	0.26	6.33	0.10	1.30	0.03	0.00	0.65	99.76
Плагиоклазиты (<i>Pl</i> $\geq$ 75%) с <i>Bt</i> , <i>Grt</i> $\pm$ <i>Ca-Amp</i> $\pm$ <i>Crn</i>													
B745-2	60.46	23.04	1.74	8.55	3.98	0.15	0.71	0.01	0.34	0.08	0.00	0.67	99.73
B745-3	60.57	22.77	1.53	9.08	3.71	0.27	0.57	0.00	0.32	0.06	0.00	0.79	99.67
B747-6	57.07	21.90	5.07	8.02	4.40	0.22	1.37	0.03	0.19	0.13	0.00	1.36	99.76
B763-5	59.80	22.01	0.74	10.82	4.23	1.00	0.35	0.00	0.10	0.03	0.00	0.57	99.65

Примечание. Химический состав пород определялся (Институт геологии, КНЦ РАН, г. Петрозаводск) рентгенофлуоресцентным анализом (XRF) на волновом спектрометре ARL ADVANT[®]X-2331 (Thermo Fisher Scientific, Ecublens, Швейцария) с родиевой трубкой, рабочее напряжение 60 кВ, ток 50 мА, разрешение 0.01°. Предварительно 2 г порошка каждой пробы нагревали в керамических тиглях при 1000°C в муфельной печи в течение 30 мин. Потери при прокаливании определяли по изменению массы образца после нагрева. Для рентгенофлуоресцентных измерений 1 г нагретого образца смешивали с тетраборатом лития и нагревали в золото-платиновом тигле до 1100°C с образованием расплавленного шарика.

клазитом, в ячейке 9 происходит выщелачивание калия из породы, а в ячейке 8 после достижения $W \sim 20$ — полное растворение кварца с переходом к бескварцевому амфиболиту с повышенным содержанием амфибола и плагиоклаза и пониженным содержанием граната по сравнению с исходным (табл. 3). Во флюиде, начиная с ячейки 8, отмечается понижение активности $\text{SiO}_2(\text{aq})$ и относительной степени насыщения $\Delta \lg a_{\text{SiO}_2}$. Одновременно происходит рост щелочности как в абсолютном выражении (рН), так и относительно амфиболита (ΔpH), повышение ΔA_{Na} (Na-метасоматоз) и более слабый рост ΔA_{Ca} (Ca-базификация). Дальнейшее развитие этих процессов приводит в ячейках 5, 6 и 7 к формированию специфической обедненной SiO_2 (менее 45 мас. %) модельной породы, содержащей около 66 мас. % *Amp*, 15–16 мас. % *Pl*, 18–20 мас. % *Grt*. Такую породу можно охарактеризовать как десилицированный амфиболит. Флюид здесь характеризуется максимальными для всей зональности значениями щелочности, ΔA_{Na} и ΔA_{Ca} , минимальными значениями насыщенности $\text{SiO}_2(\text{aq})$, а также повышенными значениями ΔA_{Fe} . В этих же ячейках наблюдается потеря массы, которая связана, очевидно, с продолжающимся выносом SiO_2 .

При возрастании W до 10^3 и выше характер процессов резко меняется (табл. 3, ячейки 2, 3, 4). Происходит замещение амфибола до полного исчезновения и частичное замещение граната все более кислым плагиоклазом. Содержания SiO_2 и Na_2O в модельной породе возрастают, а оснований снижается, в небольшом количестве появляется биотит. При дальнейшем развитии процесса в ячейке 1 появляется корунд. Концентрация $\text{SiO}_2(\text{aq})$ во флюиде остается почти постоянной, ΔA_{Na} незначительно снижается, но резко падает и становится отрицательной ΔA_{Ca} (Ca-дебазификация), при этом заметно возрастает ΔA_{Mg} . Важнейшей чертой метасоматического процесса в ячейках 1–4 является все возрастающее увеличение массы вещества ($M_{\text{кон}}$) относительно исходного количества ($M_{\text{исх}}$), т.е. его привнос флюидом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенные данные позволяют выделить три метасоматические зоны изменений амфиболита на месторождении Хитостров (рис. 6).

Зона-0 представлена кварцсодержащим амфиболитом с малыми изменениями исходного состава в ячейках 9–11, включая вынос небольшого количества K_2O (табл. 3). Хотя в действительности K в амфиболитах присутствует в составе биотита, расчетный равновесный состав включает калиевый полевой шпат. По-видимому, это обусловлено слабо проявленной мигматизацией амфиболитов, что

могло привести к некоторому избытку Al_2O_3 и SiO_2 в проанализированном веществе.

Зона-1 (табл. 3, ячейки 5, 6, 7, 8; рис. 6) формируется после полного растворения кварца с образованием десилицированного *Pl-Grt* амфиболита. Эта зона хорошо сопоставима с мафическими богатыми Na-Ca амфиболом бескварцевыми породами, в которых содержание SiO_2 снижается до 37 мас. % (табл. 2). Для этой зоны характерно сохранение почти постоянной массы породы в ячейках, несколько уменьшенной по сравнению с исходной вследствие растворения кварца. Это указывает на то, что процессы минералообразования здесь протекают путем реакций замещения без существенного отложения вещества. Эти реакции представляют собой реакции гидролиза, которые контролируются параметром ΔA_R . Исходя из данных об этом параметре и относительном количестве минералов (табл. 3, рис. 6), можно схематически обозначить процесс образования первой зоны как: $\text{Grt} + \text{Na}_2\text{O}(\text{aq}) + \text{CaO}(\text{aq}) \rightarrow \text{Amp} + \text{Pl} + \text{SiO}_2(\text{aq})$.

В **зоне-2** (табл. 3, рис. 6) происходит нарастающая плагиоклазизация десилицированного амфиболита зоны-1 с тенденцией к образованию маломинеральных олигоклазитов с гранатом и биотитом при полном замещении амфибола. По мере увеличения содержания плагиоклаза происходит постепенный переход от меланократовых к мезократовым *Amp*-содержащим плагиоклазовым породам зоны-2а и далее к лейкократовым плагиоклазовым породам вплоть до полного исчезновения амфибола в зоне-2б (рис. 6). Они подобны лейкократовым плагиоклазитам, образующим текстуры зон пропитки плагиоклазом в полосчатых меланократовых и мезократовых породах (рис. 3).

В противоположность зоне-1 в зоне-2 (рис. 6) наблюдается избыток массы, что указывает на переход от процессов замещения к процессам отложения минералов из раствора. Условием такого отложения является более высокая валовая концентрация элементов в растворе, втекающем в данную ячейку, по сравнению с концентрацией в растворе, равновесном с породой в данной ячейке. Эти валовые концентрации рассчитаны для ячеек, где наблюдается отложение вещества (табл. 4). Как видно, на всем протяжении зоны валовые концентрации Na, Al, Si непрерывно понижаются, отражая процесс кристаллизации кислого плагиоклаза. Величина этого понижения отвечает тому количеству вещества, которое осаждается из раствора в зоне-2. Одновременно раствор, взаимодействуя с амфиболитом, насыщается Са, и его концентрация непрерывно возрастает. Помимо этого, в формировании состава зоны-2 участвуют минералы замещаемой породы — гранат и амфибол. Учитывая, что количество граната в этой зоне, указанное в табл. 3, приведено к общему количе-

Таблица 3. Химический состав пород и параметры состава флюида в модели взаимодействия флюида и амфиболита (воздействующий исходный флюид, равновесный с жилой плагиоклазита)

Параметры	Источник флюида	Плаг. кл.	Номера ячеек											Исходный флюид
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
$T, ^\circ\text{C}$	710		700											
Химический состав, мас. %														
SiO_2	59.00		53.12	62.96	59.06	52.66	45.88	44.60	44.56	45.18	51.08	52.87	52.79	52.79
Al_2O_3	28.35		34.20	21.16	21.71	20.95	19.20	17.93	17.35	16.72	14.58	13.98	13.96	13.95
FeO	0.45		2.05	3.07	5.77	10.26	15.64	17.06	17.49	17.77	16.32	15.77	15.75	15.75
MgO	0.24		0.65	1.01	1.86	3.45	5.18	5.66	5.80	5.90	5.42	5.23	5.22	5.22
CaO	2.89		1.66	2.00	3.67	6.93	10.51	11.50	11.80	12.00	11.02	10.65	10.63	10.63
Na_2O	8.96		8.07	9.41	7.88	5.74	3.60	3.25	2.99	2.43	1.57	1.22	0.90	0.90
K_2O	0.11		0.24	0.39	0.06							0.28	0.76	0.77
Минеральный состав, мас. %														
Pl	90.00		76.24	88.84	77.06	52.86	24.36	16.19	14.15	13.48	9.74	5.74	1.87	1.79
Cm	8.00		16.49											
Grt	1.00		4.96	7.37	17.42	21.39	21.72	17.85	19.73	29.36	32.90	35.38	38.53	38.60
Bt	1.00		2.32	3.79	0.54									
$Ca-Amp$					4.99	25.76	53.93	65.95	66.12	57.16	46.15	42.07	39.87	39.82
Qz											11.21	15.14	15.28	15.29
Kfs												1.67	4.46	4.50
Параметры состава модельных минералов														
X_{An} в Pl	0.15		0.1	0.1	0.15	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4
$Grt \text{ Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$	0.32		0.26	0.26	0.28	0.17	0.13	0.11	0.11	0.13	0.14	0.15	0.16	0.16
$Grt: X_{Grs}$	0.08		0.02	0.04	0.10	0.19	0.28	0.32	0.36	0.37	0.37	0.38	0.39	0.39
$Amp \text{ Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$					0.71	0.56	0.47	0.44	0.44	0.48	0.51	0.52	0.54	0.54
$Amp: \text{Na, форм. ед.}$					0.87	0.86	0.85	0.84	0.80	0.66	0.55	0.55	0.55	0.55
$Amp: \text{Al, форм. ед.}$					2.78	2.76	2.72	2.65	2.51	2.11	1.80	1.82	1.83	1.83
Параметры состава флюида														
pH	5.89		5.88	5.89	5.92	5.95	5.98	5.98	5.90	5.62	5.40	5.42	5.40	5.40

Таблица 3. Окончание

Параметры	Источники данных	Номера ячеек											Исходный амфиболит
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
$T, ^\circ\text{C}$	710	700											
pH^0	5.42												5.40
ΔpH	0.47	0.48	0.49			0.58	0.58	0.50	0.21	0.00	0.02	0.00	0.00
$\lg a_{\text{SiO}_2}, \text{M}$	-0.27	-0.27	-0.27	-0.28	-0.28	-0.28	-0.27	-0.23	-0.12	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
$\lg a_{\text{SiO}_2}^0, \text{M}$	-0.02												-0.04
$\Delta \lg a_{\text{SiO}_2}$	-0.25	-0.23	-0.24	-0.24	-0.24	-0.24	-0.23	-0.19	-0.08	0.00	0.00	0.00	0.00
A_{Na}	5.24	5.25	5.26	5.28	5.32	5.35	5.35	5.26	4.97	4.72	4.70	4.68	4.68
A_{Na}^0	4.68												4.68
ΔA_{Na}	0.56	0.57	0.58	0.61	0.64	0.67	0.67	0.58	0.29	0.05	0.02	0.00	0.00
A_{K}	3.64	3.65	3.66	3.68	3.72	3.76	3.79	3.78	3.69	3.79	4.12	4.11	4.11
A_{K}^0	4.12												4.11
ΔA_{K}	-0.48	-0.47	-0.46	-0.43	-0.39	-0.35	-0.33	-0.33	-0.43	-0.32	0.01	0.00	0.00
A_{Ca}	3.84	3.33	3.60	4.03	4.33	4.54	4.65	4.67	4.60	4.53	4.54	4.55	4.55
A_{Ca}^0	4.50												4.55
ΔA_{Ca}	-0.67	-1.21	-0.94	-0.51	-0.21	0.00	0.11	0.12	0.06	-0.01	-0.01	0.00	0.00
A_{Mg}	3.24	3.21	3.23	3.26	3.06	2.91	2.84	2.81	2.80	2.78	2.79	2.79	2.79
A_{Mg}^0	2.75												2.79
ΔA_{Mg}	0.49	0.42	0.43	0.47	0.27	0.12	0.04	0.02	0.00	-0.02	-0.01	0.00	0.00
A_{Fe}	1.53	1.62	1.63	1.63	1.69	1.70	1.69	1.66	1.58	1.51	1.49	1.47	1.47
A_{Fe}^0	1.43												1.47
ΔA_{Fe}	0.10	0.15	0.16	0.16	0.22	0.23	0.22	0.19	0.10	0.03	0.02	0.00	0.00
$M_{\text{кон.}}, \Gamma$		0.243	0.477	0.823	1.40	2.95	8.54	26.3	81.8	282	923	2924	9248
$M_{\text{исх.}}, \Gamma$		0.029	0.092	0.292	0.924	2.92	9.24	29.2	92.4	292	924	2923	9242
W		1.30E + 04	4.40E + 03	2.0E + 03	1.10E + 03	540	220	79	26	7.9	2.4	0.8	0.2

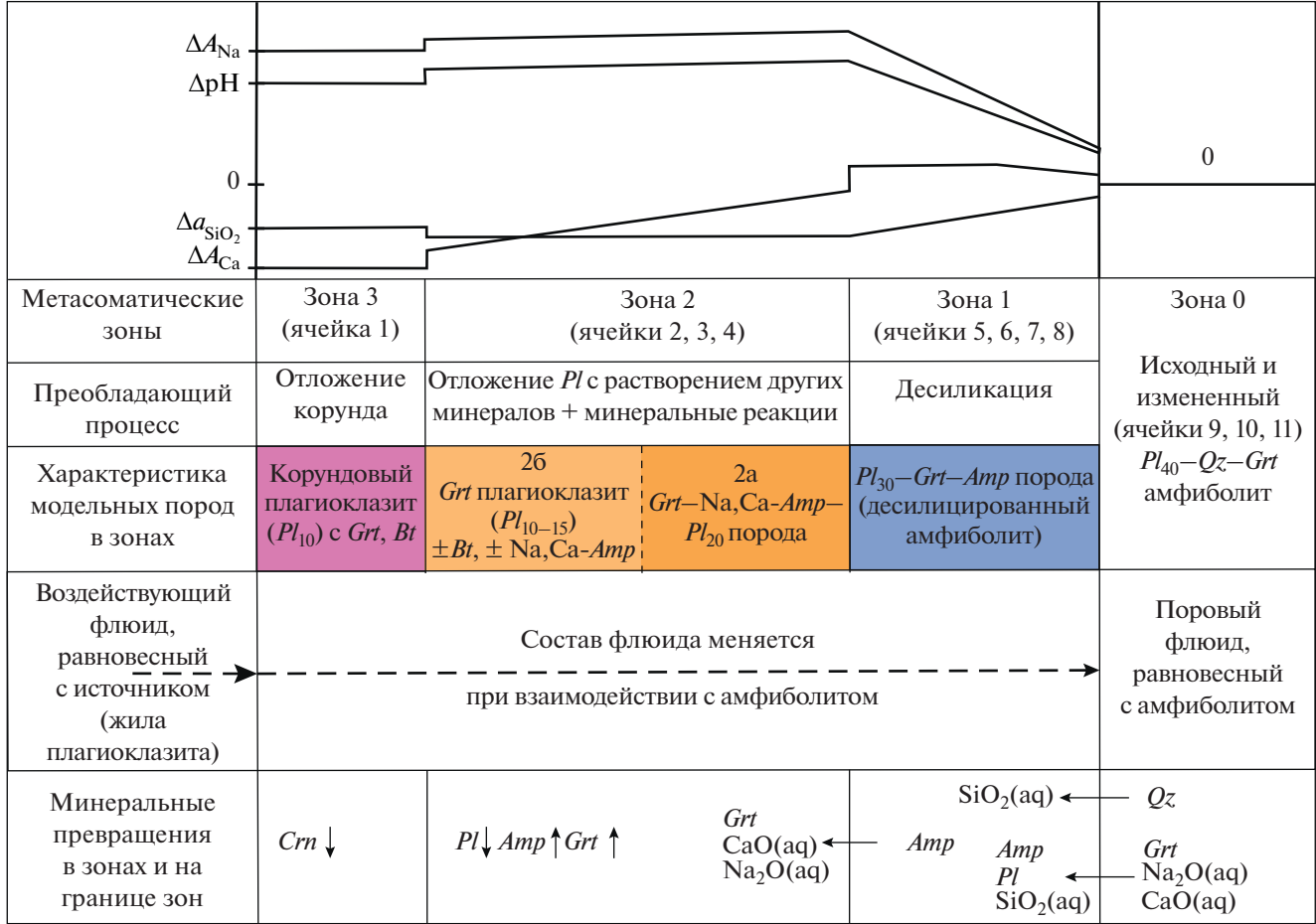


Рис. 6. Модельная метасоматическая зональность для *Crn*-содержащих пород по амфиболитам Хитострова: главные свойства и параметры инфильтрационного процесса. Цифры около *Pl* – содержание в плагиоклазе анортита в %. Обозначения характеристик флюида (ΔA_R , Δa_{SiO_2} , ΔpH) разъяснены в разделе “Методика моделирования”.

ству вещества, преимущественно осажденному, можно пересчитать его на содержание в исходном веществе в ячейках. Оказывается, что содержание граната в этом веществе на внешней границе зоны составляет 22 мас. %, затем оно возрастает до 32 и 49 мас. % и лишь после полного исчезновения амфибола снижается до 38 мас. %. Следовательно, кроме отложения плагиоклаза в зоне-2 протекает реакция замещения, которую можно схематически записать как: *Amp* → *Grt* + *CaO*(aq) + *Na₂O*(aq).

Зона-3 (табл. 3 ячейка 1; рис. 6) представлена корундсодержащим олигоклазитом с небольшой примесью граната и биотита. За исключением корунда, по составу породы и параметрам флюида эта зона почти ничем не отличается от зоны-2. В ней также резко преобладает отложение минералов из раствора, в их число входит и корунд. Следовательно, единственным фактором образования корунда в рамках рассматриваемой модели является понижение температуры от 710 до 700°C в условиях тыловой зоны, где величина *W* флю-

ид/порода максимальна. Это приводит к пересыщению первоначально насыщенного *Al₂O₃* раствора и уменьшению валовой концентрации *Al* в зоне-3 (табл. 4). Однако в большей мере этот избыток *Al* в растворе расходуется вместе с *Na* и *Si* на отложение в этой зоне плагиоклаза. Отметим, что и в дальнейшем в зоне-2 в изотермических условиях валовая концентрация *Al* в растворе понижается, но к отложению корунда это не приводит, что обусловлено, вероятно, поступлением в раствор новых порций компонентов амфиболита, которые связываются с *Al* в алюмосиликатах. Указанное положение корунда в зональности не противоречит наблюдаемому распределению его зерен в метасоматитах, которые концентрируются преимущественно вблизи контакта лейкократовых плагиоклазитов с мафическими амфиболовыми породами (десилицированными амфиболитами) зоны-1 или с более меланократовыми участками (*Grt* + *Ca*–*Amp*) зоны-2 (рис. 3 и 4). Можно полагать, что при взаимодействии про-

Таблица 4. Валовые концентрации элементов в модельном флюиде в ячейках с осаждением вещества (H₂O, моль/кг)

Элементы	Плагиноклазит	Номера ячеек				
		1	2	3	4	5
Si	0.611	0.609	0.605	0.599	0.595	0.598
Al	5.39E-02	5.24E-02	5.07E-02	4.80E-02	4.47E-02	4.16E-02
Fe	3.12E-04	3.06E-04	3.06E-04	2.86E-04	3.10E-04	3.03E-04
Mg	5.24E-06	4.11E-06	4.12E-06	4.14E-06	2.33E-06	1.50E-06
Ca	2.34E-05	6.58E-06	1.16E-05	2.79E-05	4.71E-05	6.70E-05
Na	1.043	1.042	1.040	1.038	1.036	1.034
K	2.15E-02	2.15E-02	2.14E-02	2.15E-02	2.16E-02	2.21E-02

гретого флюида и осажденного вещества с телами менее проницаемых и медленнее прогреваемых амфиболитов вблизи этого контакта возникает градиент температуры. В более проницаемых зонах пропитки, где флюидный поток более мощный, температура быстро выравнивается (Кольцов, Бушмин, 2022).

Изменение состава минералов в модельной зональности находится в хорошем соответствии с охарактеризованными выше тенденциями эволюции параметров флюида: понижением $\Delta \lg a_{\text{SiO}_2}$ в зоне-1, повышенной щелочностью (ΔA_{Na}) и магнезиальностью (ΔA_{Mg}), пониженной кальциевостью (ΔA_{Ca}) в тыловой зоне. Наблюдается постепенная деанортитизация плагиноклаза, а гранат обедняется гроссуляровым компонентом. В зоне-1 отмечается незначительное понижение магнезиальности и граната, и амфибола, но затем в зонах-2 и -3 эта величина заметно возрастает. Характерно также значительное повышение натровости и глиноземистости амфибола, который в зоне-0 отвечает роговой обманке, а в зоне-2 близок к Mg-Fe паргаситу.

Явное отличие от природной зональности — присутствие корунда только в модельной зоне-3 плагиноклазита, где максимальна величина W (соотношение флюид/порода), отражающая интенсивность процесса «промывки» флюидом. Обращает на себя внимание неравновесность корунда с минеральными парагенезисами других зон по данным термобарометрии, но при этом его постоянная ассоциация с плагиноклазом в жилах, жилках, прожилках и пятнах в породах этих зон. Таким образом, мы рассматриваем присутствие корунда в зонах-1 и -2, как результат инфильтрации флюида с образованием зоны-3 корундового плагиноклазита вдоль каналов (микротрещин) с повышенной проницаемостью, и отложение корунда совместно с плагиноклазом вследствие понижения температуры в этой зоне на фоне повышенной щелочности.

ВЫВОДЫ

1. В корундсодержащих породах с Са-амфиболом обнаружена минеральная зональность в виде закономерно повторяющейся триады минеральных зон: *внешняя* мафическая или меланократовая зона десилицированного амфиболита, *промежуточная* зона мезократовых и лейкократовых плагиноклазовых пород с Са-амфиболом, гранатом, $\pm \text{Bt}$ и *внутренняя* зона плагиноклазитов с корундом и с небольшим количеством биотита и граната. Это позволяет рассматривать окружающие кварцсодержащие амфиболиты в качестве протолита для метасоматитов с Са-амфиболом, преобладающих среди корундсодержащих пород месторождения Хитостров. Присутствие корунда в породах внешней зоны и промежуточной зоны является следствием инфильтрации в них флюида с образованием парагенезиса плагиноклаза с корундом внутренней зоны.

2. Моделирование процесса метасоматической десиликации амфиболита из окружающей метаморфической толщи обнаружило при заданных модельных параметрах возможность образования подобной зональности в виде триады минеральных зон. Помимо десиликации, эта зональность характеризуется Na-щелочным метасоматозом и Са-дебазификацией. Отложение корунда, согласно модели, происходит вместе с кислым плагиноклазом из пересыщенного Al и Si щелочного раствора вследствие понижения температуры. В отличие от кианитовых гнейсов, одной только десиликации амфиболитов для образования в них корунда недостаточно.

Благодарности. Авторы благодарны директору особо охраняемых природных территорий регионального значения Республики Карелия И.В. Кипрухину, коллегам В.М. Козловскому, Н.И. Фришману за большую помощь в организации и проведении полевых работ, а также Д.В. Доливо-Добровольскому, В.И. Ивашенко и В.М. Козловскому за плодотворное обсуждение научных проблем, затронутых в статье. Авторы выражают благодарность рецензентам Л.Я. Арано-

вичу и Н.Н. Акинфиеву за конструктивные замечания при рецензировании, позволившие улучшить первоначальный вариант рукописи.

Источники финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00270, <https://rscf.ru/project/22-27-00270/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авченко О.В., Высоцкий С.В., Чудненко К.В. Опыт моделирования реакции гранат-ортопироксен-шпинель-плагноклаз методом минимизации термодинамического потенциала // Докл. АН. 2007. Т. 415. № 1. С. 87–90.
- Акимов Е.Ю., Кольцов А.Б. Термодинамическое моделирование процесса формирования корундсодержащих метасоматитов Беломорского подвижного пояса (Фенноскандинавский щит) // Петрология. 2022. Т. 30. № 1. С. 69–90.
- Аранович Л.Я. Минеральные равновесия многокомпонентных твердых растворов. М.: Наука, 1991. 253 с.
- Аранович Л.Я. Роль рассолов в высокотемпературном метаморфизме и гранитизации // Петрология. 2017. Т. 25. № 5. С. 491–503.
- Аранович Л.Я., Козловский В.М. Роль подвижности кремнезема при образовании “зарождающихся” эклогитов // Геохимия. 2009. № 2. С. 210–215.
- Аранович Л.Я., Бортников Н.С., Бушмин С.А. и др. Флюидные потоки в региональных зонах деформаций // Петрология. 2009. Т. 17. № 4. С. 415–436.
- Аранович Л.Я., Закиров И.В., Сretenская Н.Г., Геря Т.В. Тройная система H_2O-CO_2-NaCl при высоких $P-T$ параметрах: эмпирическая модель смещения // Геохимия. 2010. № 5. С. 1–10.
- Балаганский В.В. Главные этапы тектонического развития северо-востока Балтийского щита в палеопротерозое: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. СПб., 2002. 32 с.
- Беляев О.А., Бушмин С.А., Володичев О.И. и др. Фации метаморфизма восточной части Балтийского щита. Л.: Наука, 1990. 142 с.
- Бушмин С.А., Глебовицкий В.А. Схема минеральных фаций метаморфических пород // Зап. РМО. 2008. Ч. CXXXVII. № 2. С. 1–13.
- Бушмин С.А., Вапник Е.А., Иванов М.В. и др. Флюиды гранулитов высоких давлений // Петрология. 2020. Т. 28. № 1. С. 23–54.
- Высоцкий С.В., Игнатьев А.В., Левицкий С.Ю. и др. Новые данные по стабильным изотопам минералов корундоносных образований Северной Карелии (Россия) // Докл. АН. 2011. Т. 439. № 1. С. 95–98.
- Высоцкий С.В., Игнатьев А.В., Левицкий В.И. и др. Геохимия стабильных изотопов кислорода и водорода корундоносных пород и минералов Северной Карелии как индикатор необычных условий их формирования // Геохимия. 2014. № 9. С. 843–853.
- Глазунков В.М. Отчет о результатах детальных поисков и поисково-оценочных работ на ограниченный и коллекционный корунд в Северной Карелии (1984–1985 г.). Л.: СПО “Северкварцсамоцветы”, 1985. Отчет №24808.
- Глебовицкий В.А. Тектоника и метаморфизм раннего докембрия восточной части Балтийского щита // Региональная геология и металлогения. 1993. № 1. С. 7–24.
- Глебовицкий В.А., Бушмин С.А. Послемигматитовый метасоматоз. Л.: Наука, 1983. 216 с.
- Глебовицкий В.А., Миллер Ю.В., Другова Г.М. и др. Структура и метаморфизм Беломорско-Лапландской коллизионной зоны // Геотектоника. 1996. № 1. С. 63–75.
- Доливо-Добровольский Д.В. TriQuick: программа для построения прямоугольных и треугольных точечных диаграмм, а также для отображения, создания и редактирования диаграммной графики. 2012. URL: <http://www.dimadd.ru/ru/Programs/triquick>
- Доливо-Добровольский Д.В. TC_Comb: оболочка программы THERMOCALC для эффективной мультиравновесной геотермобарометрии методом avPT с визуализацией и анализом результатов. 2013. URL: <http://www.dimadd.ru/ru/Programs/tccomb>
- Иванов М.В., Бушмин С.А. Уравнение состояния флюидной системы $H_2O-CO_2-CaCl_2$ и свойства флюидных фаз при $P-T$ параметрах средней и нижней коры // Петрология. 2019. Т. 27. № 4. С. 431–445.
- Иванов М.В., Бушмин С.А. Термодинамическая модель флюидной системы H_2O-CO_2-NaCl при $P-T$ параметрах средней и нижней коры // Петрология. 2021. Т. 29. № 1. С. 90–103.
- Карта минеральных фаций метаморфических и метасоматических пород восточной части Балтийского щита, масштаб 1 : 1500 000 (О.А. Беляев, С.А. Бушмин, О.И. Володичев и др.) // Под ред. В.А. Глебовицкого. Л.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 1991. 1 лист.
- Колесник Ю.Н. Высокотемпературный метасоматоз в ультраосновных массивах. Новосибирск: Наука, 1976. 240 с.
- Кольцов А.Б. Влияние источников и путей эволюции растворов на состав метасоматитов // Геохимия. 2015. № 2. С. 144–161.
- Кольцов А.Б., Бушмин С.А. Метасоматоз в термоградиентных условиях: модели сопряженного переноса тепла и взаимодействия флюид–порода // Петрология. 2022. № 3. С. 309–330.
- Коржинский Д.С. Открытые системы с вполне подвижными компонентами и правило фаз // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1949. № 2. С. 3–14.
- Коржинский Д.С. Теория метасоматической зональности. М.: Наука, 1982. 104 с.
- Крылов Д.П. Аномальные отношения $^{18}O/^{16}O$ в корундсодержащих породах Хитоострова (Северная Карелия) // Докл. АН. 2008. Т. 419. № 4. С. 533–536.
- Крылов Д.П., Глебовицкий В.А. Локальное распределение изотопов кислорода и обмен флюидом при формировании корундсодержащих пород Хитоострова // Докл. АН. 2017. Т. 473. № 5. С. 593–595.
- Левицкий В.И. Петрология и геохимия метасоматоза при формировании континентальной коры. Новосибирск: ГЕО, 2005. 340 с.
- Сафонов О.Г., Бутвина В.Г., Лиманов Е.В., Косова С.А. Минеральные индикаторы реакций с участием солевых компонентов флюидов в глубокой литосфере // Петрология. 2019. Т. 27. № 5. С. 525–556.

- Серебряков Н.С.* Петрология корундсодержащих пород чупинской толщи Беломорского подвижного пояса (на примере Чупинского сегмента): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ РАН, 2004. 30 с.
- Серебряков Н.С., Аристов В.В.* Условия локализации проявлений коллекционного корунда в породах чупинской толщи беломорского комплекса Северной Карелии // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. 2004. № 4. С. 36–42.
- Серебряков Н.С., Русинов В.Л.* Высокотемпературный высокobarный кальций-натриевый метасоматизм и корундообразование в докембрийском Беломорском подвижном поясе (Карелия) // Докл. АН. 2004. Т. 395. № 4. С. 529–533.
- Серебряков Н.С., Астафьев Б.Ю., Войнова О.А., Пресняков С.Л.* Первое локальное Th-U-Pb-датирование циркона метасоматитов Беломорского подвижного пояса // Докл. АН. 2007. Т. 413. № 3. С. 388–392.
- Слабунов А.И.* Геология и геодинамика архейских подвижных поясов (на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита). Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2008. 296 с.
- Слабунов Ф.И., Балаганский В.В., Щипанский А.А.* Мезо-архей-палеопротерозойская эволюция земной коры Беломорской провинции Фенноскандинавского щита и тектоническая позиция эклогитов // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 5. С. 650–677.
- Терехов Е.Н., Левицкий В.И.* Геолого-структурные закономерности размещения корундовой минерализации в Северо-Западном Беломорье // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. 1991. № 6. С. 3–13.
- Устинов В.И., Бакшеев И.А., Серебряков Н.С.* Изотопный состав кислорода минералообразующих флюидов корундсодержащих метасоматитов Хитоостровского и Варацкого проявлений, Северная Карелия // Геохимия. 2008. № 11. С. 1245–1248.
- Шваров Ю.В.* Алгоритмизация численного равновесного моделирования динамических геохимических процессов // Геохимия. 1999. № 6. С. 646–652.
- Bebout G.E., Penniston-Dorland S.C.* Fluid and mass transfer at subduction interfaces – the field metamorphic record // Lithos. 2016. V. 240–243. P. 228–258.
- Bindeman I.N., Serebryakov N.S.* Geology, Petrology and O and H isotope geochemistry of remarkably ¹⁸O depleted Paleoproterozoic rocks of the Belomorian Belt, Karelia, Russia, attributed to global glaciation 2.4 Ga // Earth Planet. Sci. Lett. 2011. V. 306. P. 163–174.
- Bushmin S.A., Glebovitsky V.A.* Scheme of mineral facies of metamorphic rocks and its application to Fennoscandian shield with representative sites of orogenic gold mineralization // Transactions of Karelian Research Centre RAS. Precamb. Geol. Ser. 2016. № 2. P. 3–27.
- Glebovitsky V.A.* Early Precambrian of Russia. London: Harwood Acad. Publ., 1997. 261 p.
- Grichuk D.V.* Thermodynamic model of ore-forming processes in a submarine island-arc hydrothermal system // Geochim. Int. 2012. V. 50. № 13. P. 1069–1100.
- Holland T.J.B., Powell R.* An internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest // J. Metamorph. Geol. 1998. V. 16. P. 309–343.
- Manning C.E.* Thermodynamic modeling of fluid–rock interaction at mid-crustal to upper-mantle conditions // Rev. Mineral. Geochem. 2013. V. 76. P. 135–164.
- Manning C.E.* Fluids of the lower Crust: Deep is different // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2018. V. 46. P. 67–97.
- Manning C.E., Aranovich L.Y.* Brines at high pressure and temperature: Thermodynamic, petrologic and geochemical effects // Precamb. Res. 2014. V. 253. P. 6–16.
- Manning C.E., Frezzotti M.L.* Subduction-zone fluids // Elements. 2020. V. 16. P. 395–400.
- Lahtinen R., Huhma H.* A revised geodynamic model for the Lapland-Kola Orogen // Precamb. Res. 2019. V. 330. P. 1–19.
- Mints M.V., Dokukina K.A., Konilov A.K.* The Meso-Neoproterozoic Belomorian eclogite province: Tectonic position and geodynamic evolution // Gondwana Res. 2014. V. 25. P. 561–584.
- Pokrovskii V.A., Helgeson H.C.* Thermodynamic properties of aqueous species and the solubilities of minerals at high pressures and temperatures: the system Al₂O₃–H₂O–NaCl // Amer. J. Sci. 1995. V. 295. P. 1255–1342.
- Powell R., Holland T.J.B.* Optimal geothermometry and geobarometry // Amer. Mineral. 1994. V. 79. P. 120–133.
- Powell R., Holland T.J.B.* An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: 3. Application methods, worked examples and a computer program // J. Metamorph. Geol. 1988. V. 6. P. 173–204.
- Shock E.L., Sassani D.C., Willis M., Sverjensky D.A.* Inorganic species in geologic fluids: correlations among standard molal thermodynamic properties of aqueous ions and hydroxide complexes // Geochim. Cosmochim. Acta. 1997. V. 61. № 5. P. 907–950.
- Steele-MacInnis M., Manning C.E.* Hydrothermal properties of geologic fluids // Elements. 2020. V. 16. P. 375–380.
- Sverjensky D.A., Hemley J.J., D'Angelo W.M.* Thermodynamic assessment of hydrothermal alkali feldspar–mica–aluminosilicate equilibria // Geochim. Cosmochim. Acta. 1991. V. 55. № 4. P. 989–1004.
- Sverjensky D.A., Shock E.L., Helgeson H.C.* Predictions of the thermodynamic properties of aqueous metal complexes to 1000°C and 5 kb // Geochim. Cosmochim. Acta. 1997. V. 61. № 7. P. 1359–1412.
- Whitney D.L., Evans B.W.* Abbreviations for names of rock-forming minerals // Amer. Mineral. 2010. V. 95. P. 185–187.
- Zakharov D.O., Bindeman I.N., Slabunov A.I. et al.* Dating the Palaeoproterozoic snowball Earth glaciations using contemporaneous subglacial hydrothermal systems Dating the Palaeoproterozoic snowball Earth glaciations using contemporaneous subglacial hydrothermal systems // Geology. 2017. V. 45. P. 667–670.

Metasomatic Transformation of Amphibolites into Corundum-Bearing Plagioclases: Zoning, Numerical Model of the Process (on the Example of the Unique Khitostrov Mineral Deposit, Fennoscandian Shield)

S. A. Bushmin¹, A. B. Kol'tsov¹, Yu. M. Lebedeva¹, and E. V. Savva¹

¹ *Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

The paper presents the results of a study of desilicated rocks of the middle crust at the level of amphibolite facies using the example of corundum-bearing plagioclases developing over the metabasites at the unique Khitostrov mineral deposit in the Belomorian-Lapland orogen of the Fennoscandian Shield. The main attention is paid to new geological data, documentation and analysis of metasomatic zoning, determination of the *P-T* conditions of its formation, and a model of the metasomatic process.

Keywords: metasomatism, desilication of amphibolites, corundum-bearing plagioclases, metasomatic zoning, numerical modeling