

# Раннепротерозойские габброидные массивы Кааламо и Велимяки в Северном Приладожье: термодинамическое моделирование кристаллизации и тренды эволюции пород\*

Р. Л. Анисимов<sup>1</sup>, М. Е. Петракова<sup>1</sup>, Ш. К. Балтыбаев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и геохронологии докембрия Российской академии наук, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

**Для цитирования:** Анисимов, Р. Л., Петракова, М. Е., Балтыбаев, Ш. К. (2023). Раннепротерозойские габброидные массивы Кааламо и Велимяки в Северном Приладожье: термодинамическое моделирование кристаллизации и тренды эволюции пород. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 68 (2), 265–292. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2023.204>

Массивы Кааламо и Велимяки расположены в юго-восточной части Раахе-Ладожской зоны сочленения Карельского кратона и Свекофеннского складчатого пояса Фенно-скандинавского щита. Изученные массивы прорывают толщи раннепротерозойских метаморфизованных вулканогенно-осадочных пород ладожской серии и кристаллизовались субсинхронно. Несмотря на одинаковый возраст и сходное тектоническое положение, породы массивов резко отличаются вещественным составом, особенно содержанием щелочей. При помощи пакета программ MELTS и Magma Chamber Simulator было проведено термодинамическое моделирование магматической кристаллизации и показано, что породы массивов не образуются при фракционной кристаллизации единой родительской магмы за счет допустимого изменения таких параметров кристаллизации, как давление, содержание воды в расплаве и фугитивности кислорода. Для расчетов было использовано 85 силикатных анализов пород кааламского и велимякского комплексов. Увеличение общего давления приводит к смещению тренда составов в более щелочную область, увеличение содержания воды в расплаве наоборот смещает тренд в менее щелочную область. Уменьшение фугитивности кислорода смещает тренд в более щелочную область. Сдвиг тренда составов остаточного расплава в субщелочную область наблюдается и в случае, если происходила контаминация расплава, но только на большой глубине, где существовали условия для выплавки заметных объемов боковых пород. Сделан вывод, что влияние контаминации на уровне формирования магматической камеры (в верхней коре) незначительно и существенно не влияет на тренды изменения составов пород. Габброиды массивов образовались либо из разных расплавов, либо их родоначальный расплав был общим, но впоследствии отделившаяся магма массива Велимяки

---

\* Работа выполнена за счет финансирования темы НИР ИГГД РАН (№ FMUW-2022-0002) Минобрнауки России.

претерпела контаминацию и обогатилась щелочами на большой глубине — до достижения уровня верхней коры.

*Ключевые слова:* палеопротерозой, Свекофеннский пояс, габброиды, термодинамическое моделирование, MCS, MELTS.

## 1. Введение

Магматические комплексы Северного Приладожья связаны с предшествующими аккреционно-коллизийными процессами и по отношению к стадиям свекофеннского орогенеза сформировались в несколько этапов магматической активности: ранне-, син-, поздне- и посторогенный (Ладожская протерозойская структура..., 2020). В пределах Раахе-Ладожской зоны сочленения (рис. 1) архейского Карельского кратона и протерозойского Свекофеннского складчатого пояса в раннеорогенную стадию внедрялись интрузии кааламского и велимякского комплексов, наиболее крупные из которых — это петротипичные массивы Кааламо и Велимяки (Nackman, 1929; Саранчина, 1948; Макарова, 1967; Свириденко и др., 1976; Светов и др., 1990; Иващенко и др., 1998; и др.).

Внимание многих исследователей к этим магматическим комплексам было приковано еще два столетия назад, что вызвано их рудоносностью. Так, во второй половине XIX в. в пределах массива Велимяки производилась добыча титаномагнетитовых руд. С породами массива Кааламо связано медно-никелевое оруденение (Иващенко и Голубев, 2011).

Породы кааламского комплекса дифференцированы от верлитов и оливинных клинопироксенитов до тоналитов и относятся к породам нормальной щелочности. Породы велимякского комплекса дифференцированы от клинопироксенитов до монзонитов и относятся к умеренно щелочной (субщелочной) серии (рис. 2).

U-Pb изотопный возраст массива Кааламо определен по циркону как  $1883 \pm 5$  млн лет (Богачев и др., 1999а), а изотопный возраст массива Велимяки, также определенный локальным U-Pb датированием циркона, для габбро —  $1894 \pm 6$  млн лет, а для клинопироксенита —  $1874 \pm 24$  млн лет (Алексеев, 2008). При некотором расхождении возрастных данных они в пределах погрешности совпадают, что позволяет считать образование двух массивов субсинхронным.

Несмотря на совпадающий или близкий возраст изучаемых пород массивов, их одинаковую тектоническую позицию, сходный порядок кристаллизации минералов, они отличаются рядом геохимических параметров, что, возможно, является следствием специфики их кристаллизации. Предварительные результаты термодинамического моделирования выявили составы, которые могли бы отвечать материнским расплавам обоих комплексов (Анисимов и др., 2021).

В настоящей статье на основе опубликованных и оригинальных авторских минерало-петрографических и петрохимических данных делается следующий шаг к ответу на вопрос о различиях сравниваемых типов пород. Этот шаг заключается в проверке влияния на магматическое минералообразование таких параметров, как водонасыщенность расплавов, глубина становления комплексов, фугитивность кислорода, возможность ассимиляции вмещающих пород и за счет этого — контаминация расплавов. Необходимо было проанализировать возможность образования пород двух комплексов из единого или разных по составу источников. Для

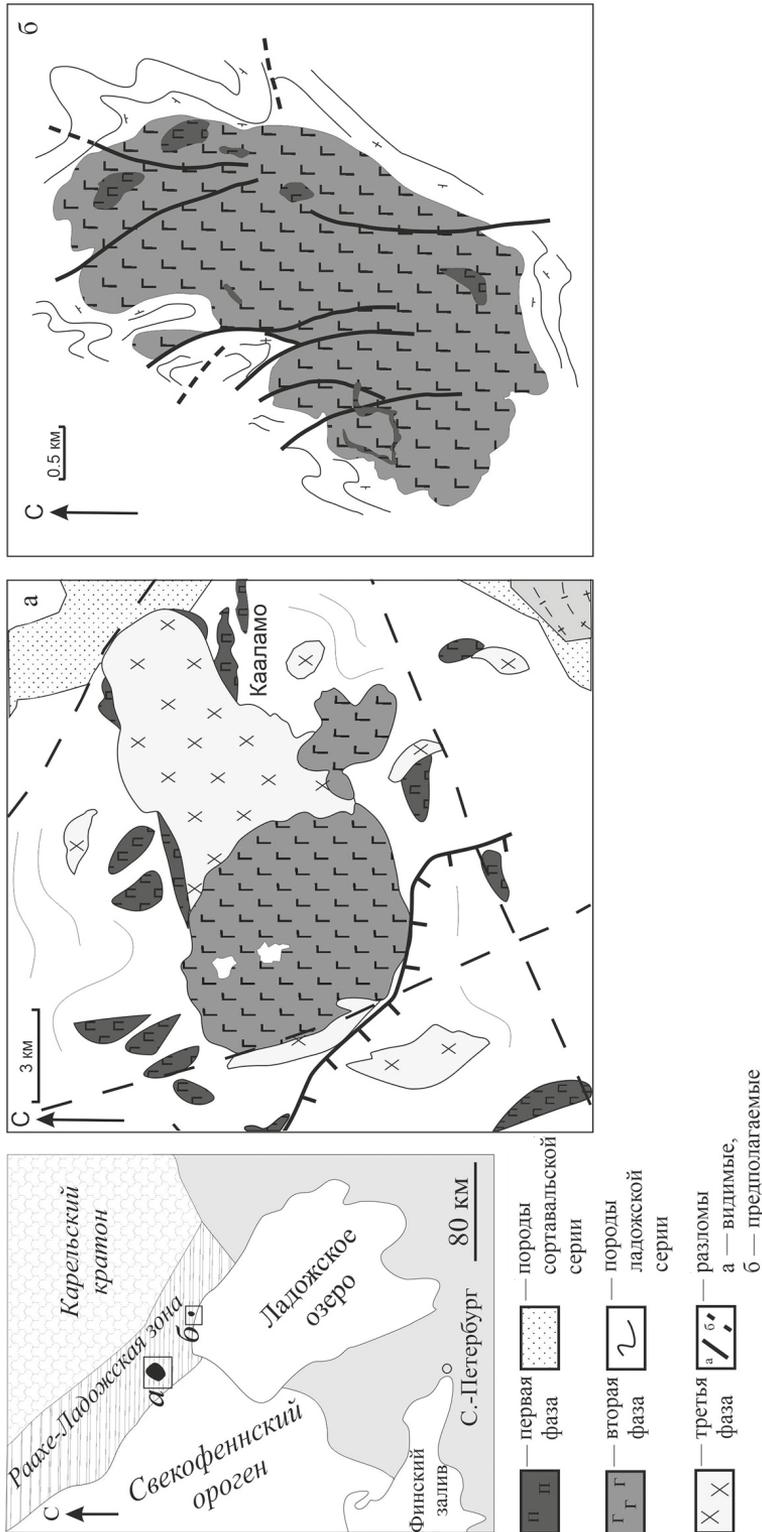


Рис. 1. Схематические карты массивов Кааламо (а) и Велимяки (б) (Ладожская протерозойская структура..., 2020) с дополнениями. Слева показана схема положения изученных массивов с указанием основных тектонических структур региона

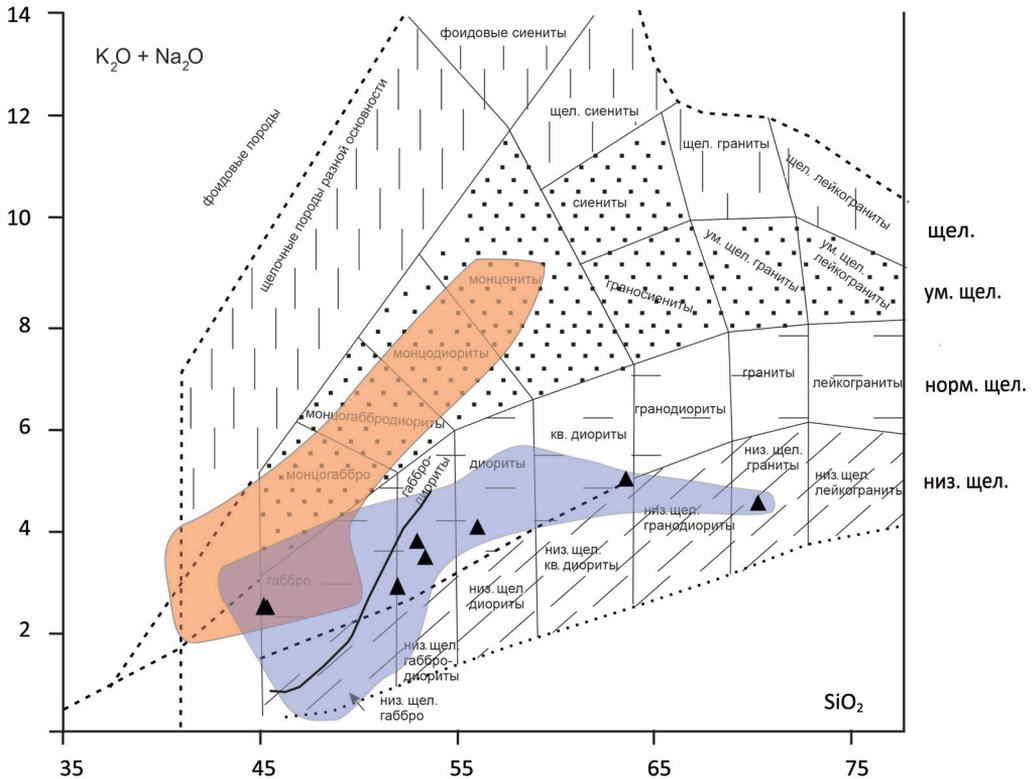


Рис. 2. TAS-диаграмма (Шарпенко и др., 2013) с составами пород кааламского и велимякского комплексов. Показаны области составов пород кааламского (синее поле) и велимякского комплексов (оранжевое); треугольниками обозначены авторские анализы пород массива Кааламо. Разделительной линией показаны две подобласти составов пород массивов Кааламо, из которых при термодинамическом моделировании воспроизводятся умеренно-щелочные тренды остаточных расплавов (составы слева от линии) и тренды нормальной щелочности (составы справа). Здесь и далее содержания оксидов приведены в весовых процентах

анализа и проверки моделей кристаллизации пород применяется инструмент термодинамического моделирования MCS (Bohrson et al., 2014) и программный пакет MELTS (Ghiorso and Sack, 1995).

## 2. Краткая геологическая характеристика объектов исследования

Кааламский комплекс включает одноименный крупный (~80 км<sup>2</sup>) массив, расположенный в 30 км к северу от г. Сортавала, который в плане имеет форму неправильного овала (12×6 км) северо-восточного простирания (рис. 1, а) и ряд более мелких тел-сателлитов: Араминлампи, Ихаланваара, Сури-Суо, Кеккоселька, Винаоя, Кархонланмяки и др. (Ладожская протерозойская структура..., 2020). Данные сателлиты относятся к единому комплексу по пространственной близости, соотношению с породами рамы, вещественному составу и предполагаемому возрасту.

Вещающими для пород массива Кааламо являются раннепротерозойские супракрустальные толщи: гранат-биотитовые гнейсы и слюдястые сланцы ладож-

ской серии, а также амфиболиты сортавальской серии. Контакты массива Кааламо с вмещающими породами секущие, иногда субсогласные. Для эндоконтактов характерны многочисленные ксенолиты разного размера, которые представлены слюдяными и амфиболовыми сланцами, мраморами (Саранчина, 1949).

В массиве Кааламо большинство исследователей (Саранчина, 1949; Макарова, 1971; Богачев и др., 19996; Лавров и Кулешевич, 2016; Ладожская протерозойская структура..., 2020), а также наши личные наблюдения подтверждают выделение трех основных фаз: 1) верлиты, оливиновые клинопироксениты, плагиопироксениты, меланогаббро; 2) габбронориты, габбродиориты; 3) диориты, кварцевые диориты, тоналиты, плагиограниты. Для всех фаз характерно исключительное петрографическое и структурное разнообразие пород — от мелкозернистых до гигантозернистых и пегматоидных.

*Велимякский комплекс*, помимо одноименного массива, который имеет форму овала (4×2 км) северо-восточного простирания (см. рис. 1, б) и расположен на северном берегу Ладожского озера, в 5 км восточнее пос. Ляскеля, включает интрузивные породы острова Мякисало, расположенного к юго-западу от массива Велимяки (Алексеев и Котова, 2010). Вмещающими породами являются кварцбиотитовые и ставролитовые сланцы ладожской серии. Массив образовался в две фазы внедрения и сложен: первая фаза — клинопироксенитами, вторая — габбро, диоритами и монцодиоритами, монцонитами (Богачев и др., 19996).

Как уже упоминалось, для пород кааламского комплекса характерен эволюционный тренд нормальной щелочности, а для велимякского — субщелочной. На диаграмме TAS составы пород кааламского комплекса варьируют за редким исключением от габбро до гранодиоритов, а велимякского — от габбро до монцогаббро и монцонитов (рис. 2).

На диаграммах Харкера видно, что породы велимякского комплекса, по сравнению с породами кааламского комплекса, значительно обогащены калием и фосфором, в меньшей степени натрием, незначительно обеднены кальцием и магнием (рис. 3). Для обоих комплексов характерна положительная корреляция  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{SiO}_2$ , отрицательная корреляция  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  с  $\text{SiO}_2$ . Для пород велимякского комплекса обнаруживается отрицательная корреляция  $\text{P}_2\text{O}_5$  и  $\text{SiO}_2$  и слабая положительная корреляция  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$ , в то время как для пород кааламского комплекса корреляция этих оксидов отсутствует. В породах обоих комплексов отсутствует корреляция  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{SiO}_2$ .

Все описываемые магматические породы обоих комплексов метаморфизованы совместно с окружающими породами в условиях амфиболитовой фации при  $T \sim 500\text{--}600\text{ }^\circ\text{C}$  и  $P \sim 4\text{--}5$  кбар (Саранчина, 1949; Ладожская протерозойская структура..., 2020).

### 3. Краткое петрографическое описание пород

#### 3.1. Породы кааламского комплекса

*Первая фаза* — оливиновые клинопироксениты, плагиопироксениты, меланократовое габбро (рис. 4, а, б). Породы, как правило, интенсивно амфиболизированы с образованием пойкилобластических агрегатов роговой обманки, в которой сохраняются реликты плагиоклаза, клинопироксена и оливина, а также редкого ортопироксена (Богачев и др., 19996). Слабоизмененные клинопироксениты — серо-зеле-

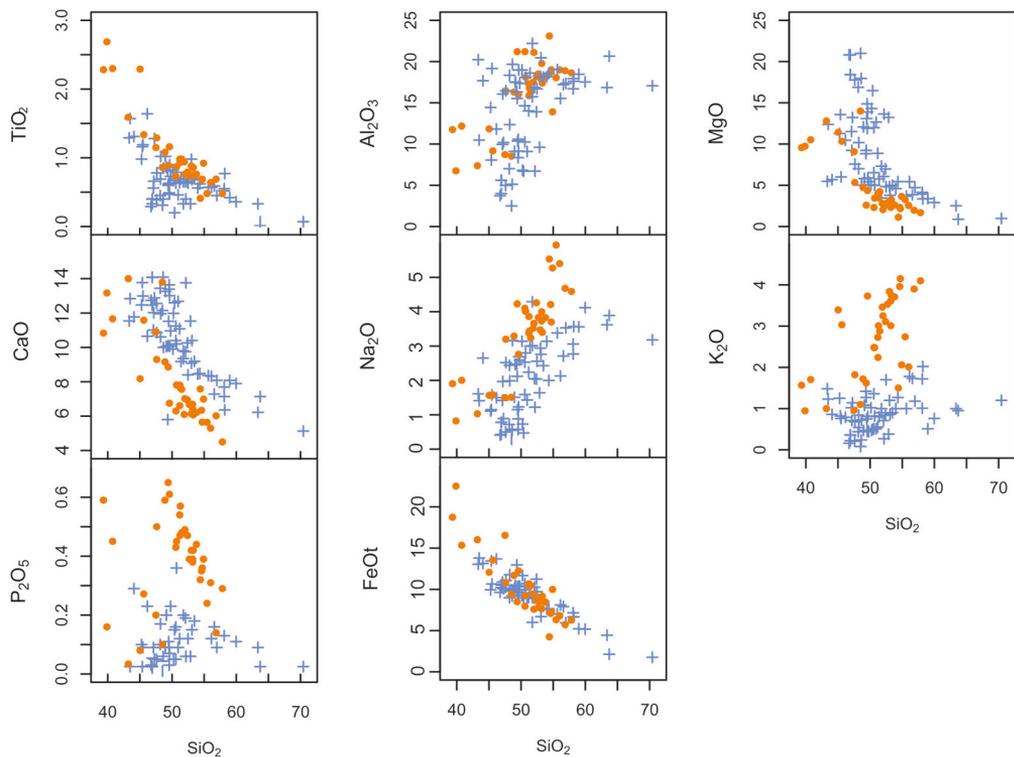


Рис. 3. Диаграммы Харкера с составами пород велимякского (оранжевые точки) и кааламского (синие плюсы) комплексов

ного цвета, а сильно амфиболизированные ультрамафиты имеют темно-зеленую, практически черную окраску. Первичные структуры пород нарушены метаморфической перекристаллизацией и определяются как реликтовые пойкилитовая (для оливиновых клинопироксенитов), панидиоморфно-призматическизернистая (для клинопироксенитов), габбро-офитовая (для габбро). В плагиофироксенитах иногда отмечается интеркумулусная структура. Текстура пород массивная и директивно-полосчатая. Главные породообразующие минералы представлены оливином ( $\text{Fa}_{36}$ ), интенсивно замещенным амфиболом, а также идингситом и тальком. Клинопироксен относится к ряду диопсид-геденбергит. Характерно наличие очень основного плагиоклаза — до битовнит-анортита. Второстепенные и акцессорные минералы: биотит, титанит, апатит, магнетит, сульфиды (пирротин, пирит, реже халькопирит).

*Вторая фаза — габбронориты, габбродиориты* (рис. 4, в, г). Породы серого и зеленовато-серого цвета массивной текстуры, полосчатые и гнейсовидные. Структура пород габбро-офитовая и габбровая. Главные минералы — плагиоклаз, иногда ритмически зональный с составом ядер  $\text{An}_{60}$  и периферических частей  $\text{An}_{40-45}$ . Однородные кристаллы представлены андезин-лабрадором  $\text{An}_{42-54}$ . Темноцветные минералы представлены диопсид-геденбергитом, железистым ортопироксеном  $\text{Fs}_{52-58}$ . Пироксены интенсивно замещаются роговой обманкой и куммингтонитом, иногда биотитом. Второстепенные и акцессорные минералы те же, что и в породах первой фазы; кроме того, отмечается циркон.

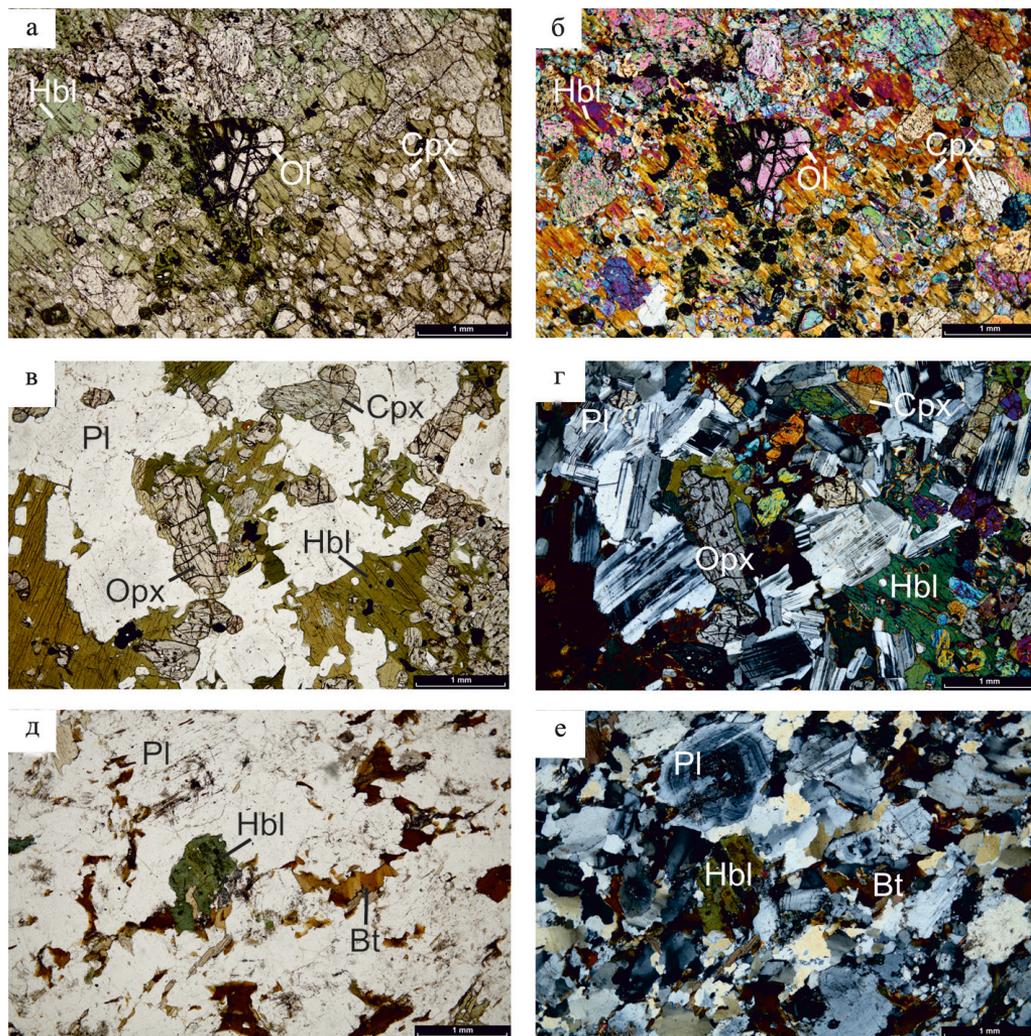


Рис. 4. Микрофотографии шлифов пород кааламского комплекса:

а, б — оливиновый клинопироксенит без анализатора и с анализатором; в, г — габбродиорит без анализатора и с анализатором; д, е — тоналит без анализатора и с анализатором. Здесь и далее аббревиатуры минералов даны по (Whitney and Evans, 2010)

Третья фаза — диориты, тоналиты, плаггиограниты (рис. 4, д, е). Породы более светлые по сравнению с габброноритами, массивной и гнейсовидной текстуры. Структура наименее измененных пород гипидиоморфная. Плаггиоклаз, нередко с осцилляторной зональностью, представлен андезином. В породах присутствует кварц, его содержание в тоналитах может превышать 20%. Темноцветные минералы представлены роговой обманкой и биотитом, частично первично-магматическими. В диоритах роговая обманка иногда содержит реликты клинопироксена. Второстепенные и акцессорные минералы те же, что и в породах второй фазы (Богачев и др., 1999б).

### 3.2. Породы велимякского комплекса

Первая фаза — клинопироксениты (рис. 5, а, б). Клинопироксениты представлены крупными телами линзовидной и овальной формы, а также в виде шпировидных, жилоподобных разностей. Породы почти всегда в той или иной степени амфиболитованы (Богачев и др., 1999б). Для относительно слабо измененных пород характерны такситовые и полосчатые текстуры, панидиоморфно-призматические, интеркумулусные и сидеронитовые структуры. Клинопироксен представлен диопсидом-геденберgitом, оливин практически всегда замещен волокнистым амфиболом или иддингситом и узнается по характерным формам псевдоморфоз. Плаггиоклаз имеет состав  $An_{42-52}$ . В некоторых плаггиопироксенитах наблюдается также калиевый полевой шпат. В породах есть как метаморфогенная зеленая роговая обманка, так и темно-бурая, вероятно поздне-, постмагматическая. Также наблюдается биотит, его содержание до 10–15 об.%. Содержание магнетита составляет 10–12 об.%, в рудных пироксенитах достигает 30 об.% и более. Второстепенные минералы: титанит, апатит (его содержание может достигать 12 об.%), алланит, циркон, сульфиды (пирротин, пирит, реже халькопирит).

Вторая фаза — габбро, диориты, монцодиориты, монцониты (рис. 5, в, г). Для габбро и диоритов характерны реликтовые габброофитовые и порфиоровидные структуры. Главные породообразующие минералы: клинопироксен (в габбро), клинопироксен и роговая обманка (в диоритах), плаггиоклаз (обычно андезин  $An_{38-48}$ ), биотит. Появление калиевого полевого шпата обуславливает переход от диоритов

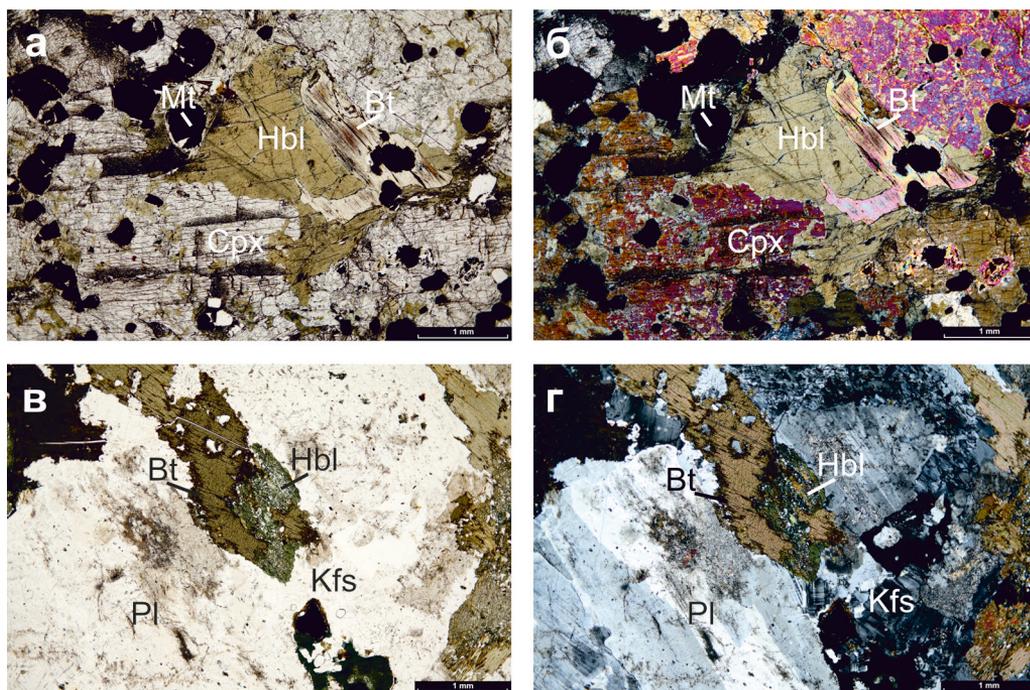


Рис. 5. Микрофотографии шлифов пород велимякского комплекса:

а, б — клинопироксенит без анализатора и с анализатором; в, г — монзонит без анализатора и с анализатором

к монцодиоритам. Его содержание в монцодиоритах достигает 10–25 об. %, а в монцонитах — до 40 об. %. Главные минералы монцодиоритов и монцонитов: плагиоклаз (андезин-олигоклаз), калиевый полевой шпат, роговая обманка, биотит. Кварц не характерен. Второстепенные и аксессуарные минералы те же, что и в породах первой фазы (Богачев и др., 1999б).

#### 4. Фактический материал и методы исследования

Для расчетов были использованы 85 силикатных анализов пород кааламского и велимякского комплексов, из которых 77 анализов заимствованы из опубликованных источников (Свириденко и др., 1976; Богачев и др., 1999б; Алексеев и Котова, 2010; Иващенко и Голубев, 2011; Лавров и Кулешевич, 2016; Алексеев и Кулешевич, 2017), остальные 8 анализов выполнены по авторским пробам в лаборатории ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург) (табл. 1) на рентгеновском спектрометре ARL 9800 по методике «Определение содержаний основных петрогенных элементов и некоторых микроэлементов в горных породах, почвах, донных и рыхлых отложениях из прессованных таблеток тонкоизмельченного исходного материала проб рентгеноспектральным флуоресцентным методом»<sup>1</sup>. Диапазоны содержаний для определяемых компонентов: SiO<sub>2</sub> (0.02–100 вес. %), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.02–50 вес. %), TiO<sub>2</sub> (0.01–10 вес. %), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.01–50 вес. %), MnO (0.01–40 вес. %), MgO (0.05–50 вес. %), CaO (0.01–50 вес. %), Na<sub>2</sub>O (0.05–20 вес. %), K<sub>2</sub>O (0.01–20 вес. %), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0.01–50 вес. %), Ba (50 г/т–2 вес. %), Sr (20 г/т–10 вес. %), V (50 г/т–2 вес. %).

Термодинамические расчеты кристаллизации минералов из расплава базируются на алгоритмах, реализованных в семействе программ MELTS (Ghiorso and Sack, 1995; Asimow and Ghiorso, 1998), которые позволяют рассчитать последовательность кристаллизации минеральных фаз из расплава заданного состава и оценить эволюцию остаточного расплава в условиях равновесной или фракционной кристаллизации. MELTS в настоящее время включает в себя версии: pMELTS, rhyolite-MELTS версии 1.0.x, 1.1.x и 1.2.x<sup>2</sup> (Ghiorso and Sack, 1995; Asimow and Ghiorso, 1998; Ghiorso et al., 2002; Gualda et al., 2012; Ghiorso and Gualda, 2015).

При расчете эволюции магматической системы в MELTS может моделироваться минералообразование с изменением температуры и давления (минимизация энергии Гиббса системы), температуры и объема (минимизация энергии Гельмгольца), энтальпии и давления (максимизация энтропии) или энтропии и давления (минимизация энтальпии).

Программный пакет MELTS использует модель двенадцатикомпонентного силикатного расплава в системе SiO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–FeO–MgO–CaO–Na<sub>2</sub>O–K<sub>2</sub>O–P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–H<sub>2</sub>O. В нем учтены свойства твердых растворов и присутствуют магматические минералы: оливины, гранаты, мелилиты, ортопироксены, клинопироксены, амфиболы (ряд куммингтонита-грюнерита, тремолита-ферроактинолита, паргасита-ферропаргасита и магнезиогастингсита-гастингсита), биотиты, полевые шпаты, нефелины, ряд лейцита-Na-лейцита и анальцима-K-анальцима, шпинели, ромбоэдрические оксиды и ортооксиды (ряд псевдобрукита-ферропсевдобрукита-

<sup>1</sup> Доступно на: <https://vsegei.ru/ru/activity/labanalytics/lab/lab-operations/rentgenspektr>. [Дата доступа 21.02.2022].

<sup>2</sup> Доступно на: <http://melts.ofm-research.org>. [Дата доступа 21.02.2022].

карроюита). Для калибровки расчетов авторы MELTS использовали более 2500 экспериментально определенных составов силикатных расплавов, что позволяет рассчитывать модели, применимые к природным магматическим системам (как водным, так и безводным) от оливиновых нефелинитов до риолитов в диапазоне температур (Т) 500–2000°C и давлений (Р) до 2 ГПа.

Таблица 1. Содержания петрогенных оксидов (вес. %) в породах кааламского комплекса

Оксиды	Фаза внедрения, порода и шифр образца							
	I Меланогаббро К337	I Габбро К324	II Габбро- диорит К343	II Габбро- диорит К325	II Габбро- диорит К328	III Диорит К340	III Тоналит К318	III Плаггиогранит К342
SiO <sub>2</sub>	45.26	45.48	52.09	53.10	53.48	56.13	63.72	70.43
TiO <sub>2</sub>	0.98	1.19	0.65	0.68	0.70	0.57	0.07	0.07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.44	19.16	16.86	20.46	18.11	15.53	20.65	17.06
FeOt	9.94	10.65	10.26	6.69	8.57	8.11	2.13	1.77
MnO	0.15	0.18	0.22	0.15	0.16	0.16	0.03	0.04
MgO	11.28	6.01	6.07	3.79	5.00	5.44	0.88	0.98
CaO	12.47	12.99	9.75	10.40	9.19	8.32	7.14	5.13
Na <sub>2</sub> O	1.11	1.58	2.05	2.76	2.43	2.13	3.89	3.18
K <sub>2</sub> O	1.25	0.76	0.71	0.86	0.90	1.78	0.95	1.20
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.10	0.09	0.19	0.15	0.18	0.12	<0.05	<0.05
ппп	1.90	0.90	0.17	0.25	0.54	0.95	0.44	0.25
Сумма	98.87	98.99	99.03	99.29	99.26	99.24	99.91	100.10
Mg#	0.67	0.50	0.51	0.50	0.51	0.54	0.42	0.50

Примечание. В таблице обозначены: ппп — потери при прокаливании; Mg# = MgO/(MgO+FeOt) (молекулярные количества).

Важным дополнением к пакету MELTS стал вспомогательный набор инструментов MCS — Magma Chamber Simulator (Bohrson et al., 2014). MCS — термодинамическая модель открытой системы, где возможно моделирование чистой фракционной кристаллизации (FC) и фракционной кристаллизации с учетом ассимиляции вмещающих пород (AFC) и/или смешения с добавочными порциями расплава (recharge — RFC или RAFC). MCS производит моделирование, основанное на порообразующих элементах и на редких элементах, поддерживает до 48 микроэлементов, включая радиогенные изотопы (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr, <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd, <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf, <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb, <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb, <sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>Os) и стабильные изотопы кислорода. Набор инструментов MSC был применен для проверки модели образования А-гранитов Центральной Финляндии и связанных с ними пород среднего состава из родоначального мафического расплава мантийного происхождения (Kärenlampi et al., 2021). Моделирование показало, что образование данных гранитов возможно в процессе фракционной кристаллизации расплава основного состава при его контаминации веществом архейской коры.

В настоящей работе применен пакет программ MELTS и MCS с версией rhyolite-MELTS 1.2.0, которая оптимизирована для пород основного состава. Отметим, что в данных программах плохо моделируются фазовые равновесия с участием амфибола и биотита, а также равновесия вблизи температуры солидуса<sup>3</sup>, поэтому мы моделировали ранний этап кристаллизационной дифференциации — примерно до температуры 800°С.

## 5. Результаты моделирования

При моделировании анализировались различные возможные механизмы и факторы кристаллизации магматических пород.

Рассматривались модели, когда материнский расплав/расплавы проходили фракционную кристаллизацию в одной или нескольких промежуточных камерах и допускалось, что на определенных этапах кристаллизации часть расплава покидала промежуточную камеру и перемещалась выше, где формировала интрузивные массивы. Таких порций, вероятно, было три для массива Кааламо — они и сформировали три фазы внедрения. Массив Велимяки, в котором выделяются две фазы, предположительно, сформировался в результате внедрения двух порций магмы.

Расчет кристаллизации пород проводился при давлениях 4, 8 и 12 кбар и содержании воды в расплаве 1 и 5 вес. %. Фугитивность кислорода задавалась буферами IW, QFM, NNO, HM.

Ниже рассматриваются возможные сценарии образования двух массивов.

*Модель № 1* — тестирование составов пород кааламского и велимякского комплексов, взятых как исходные составы расплавов с проверкой возможности образования из них разных эволюционных трендов остаточных расплавов.

Для изучения данной модели была рассчитана фракционная кристаллизация для каждого из имеющихся составов пород кааламского и велимякского комплекса при следующих начальных параметрах: давление — 4 кбар, что отвечает оценкам по минеральным геобарометрам окружающих пород (Балтыбаев и др., 2000), содержание воды в расплаве — 1 вес. %, кислородный буфер — QFM. Тренды эволюции остаточных расплавов наносились на TAS-диаграмму.

*Результаты.* Подавляющее большинство составов пород велимякского комплекса образовало типичный для него субщелочной тренд. Для кааламского комплекса оказалось, что примерно половина исходных составов пород порождает типичный для него тренд нормальной щелочности, а другая половина, для которой характерно повышенное содержание щелочей, — субщелочной. Эти две группы занимают закономерные области на TAS-диаграмме (см. рис. 2).

*Модель № 2* — тестирование возможности образования пород массивов из одного материнского расплава, но при условии, что расплав массива Велимяки был контаминирован (AFC) на уровне формирования его магматической камеры.

О возможности контаминации расплава массива Велимяки свидетельствует наличие в эндоконтактной зоне гибридных пород — диоритов, образовавшихся, вероятно, в результате взаимодействия расплава с вмещающими породами (Алексеев и Котова, 2010). Для изучения данной модели была рассчитана фракционная

<sup>3</sup> Доступно на: <http://melts.ofm-research.org/index.html>. [Дата доступа 21.02.2022].

кристаллизация с ассимиляцией вмещающих пород для одного из составов кааламского комплекса с трендом нормальной щелочности (образец Араминлампи-1) (табл. 2). Данный состав был выбран, поскольку при начальных параметрах модели № 1 он воспроизводит последовательность кристаллизации минералов, их соотношения, наиболее приближенные к реально наблюдаемым. В качестве вмещающей породы, контаминация которой предполагалась, был взят средний состав метапелитов ладожской серии (табл. 2). Расчет производился для глубины, соответствующей давлению 4 кбар. Температура вмещающих пород для разных расчетов варьировала от 300 до 500° С, верхняя граница ограничивалась температурой метаморфизма пород этого региона (Балтыбаев и др., 2000). Прочие параметры были взяты аналогично модели № 1: содержание воды в расплаве — 1 вес. %, кислородный буфер — QFM.

Таблица 2. Содержания петрогенных оксидов (вес. %) в выбранных образцах для тестирования FC и AFC моделей кристаллизации

Образец	Кааламский комплекс, Араминлампи-1*	Велимякский комплекс, 619**	Средний состав метапелитов ладожской серии***	Средний состав гранито-гнейсов****
SiO <sub>2</sub>	49.56	48.50	58.96	70.67
TiO <sub>2</sub>	0.63	0.86	1.05	0.49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.58	8.53	16.89	13.27
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.45	–	–	0.82
FeO	9.94	–	–	3.26
Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	–	10.40	11.19	–
MnO	0.18	0.15	0.06	0.05
MgO	11.90	14.00	3.28	0.81
CaO	13.64	13.80	1.82	1.50
Na <sub>2</sub> O	0.88	1.51	1.66	4.06
K <sub>2</sub> O	0.45	1.10	3.03	3.82
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	0.10	0.1	–

\* Исходный состав массива Кааламо (Ивашенко и Голубев, 2011).

\*\* Исходный состав массива Велимяки (Алексеев и Котова, 2010).

\*\*\* Средний состав метапелитов ладожской серии (Борисова и Балтыбаев, 2021).

\*\*\*\* Средний состав гранито-гнейсов Импилахтинского купола (Лобач-Жученко и др., 1973).

*Результаты.* На уровне формирования магматической камеры массива Велимяки контаминация начинается при снижении температуры расплава до 1084° С (температура ликвидуса — 1259° С), то есть в интервале температур от 1259 до 1084° С тепловая энергия расплава расходовалась на нагрев вмещающей породы и ее плавление. После начала плавления вмещающих пород порции расплава могли смешиваться с исходной магмой, контаминируя ее. В ходе такой контаминации тренд, как показано на TAS-диаграмме, смещается в более щелочную область, но это смещение недостаточно сильное, чтобы перейти из области нормальной щелочно-

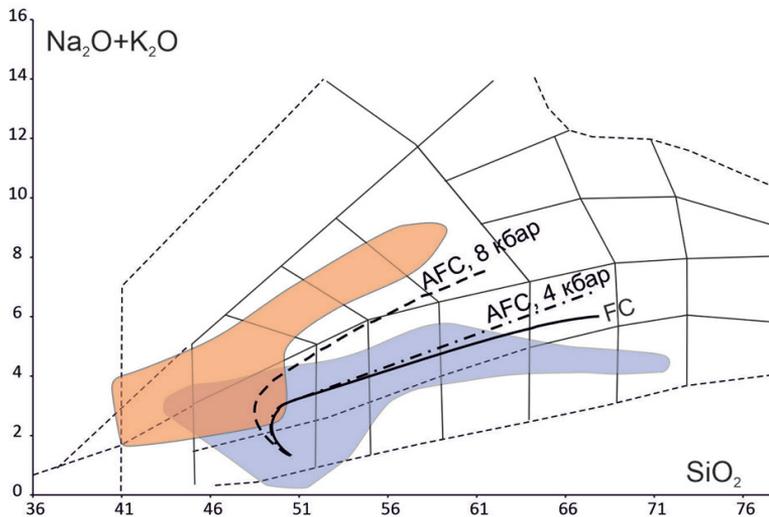


Рис. 6. Модельные тренды эволюции остаточного расплава при фракционной кристаллизации с ассимиляцией (AFC) и без нее (FC) (модель 2). Полями обозначены области реальных составов пород кааламского (синее поле) и велимякского (оранжевое поле) комплексов

сти в субщелочную (рис. 6, линия для 4 кбар). Отдельно стоит отметить возможность сдвига тренда составов остаточного расплава в субщелочную область, если контаминация происходила на большей глубине. В таком случае за счет начальной более высокой температуры вмещающих пород ( $> 600^{\circ}\text{C}$ ) и более кислого их состава (нами рассматривался состав архейского гранито-гнейса, предполагаемого на глубине, табл. 2) плавление боковых пород становится существенным и значимо влияющим на тренд эволюции состава контаминированного расплава (рис. 6, AFC 8 кбар).

*Модель № 3* — тестирование возможности образования пород двух массивов из одного материнского расплава; магматические камеры были расположены на разной глубине, вследствие чего кристаллизация происходила при разном давлении.

Для проверки данной модели рассчитана фракционная кристаллизация при давлении 4, 8 и 12 кбар. В качестве материнских расплавов массивов Кааламо и Велимяки взяты составы пород, которые, как и в предыдущей модели, воспроизвели последовательность минералов, наиболее приближенную к реальной (см. табл. 2). Другие параметры были взяты аналогично модели № 1: содержание воды в расплаве — 1 вес. %, кислородный буфер — QFM.

*Результаты.* Увеличение общего давления в целом приводит к смещению тренда составов в более щелочную область (рис. 7). При этом при давлении 8 кбар для массива Кааламо моделируется исчезновение оливина и пижонита, для массива Велимяки — уменьшение поля кристаллизации оливина и биотита, исчезновение ортопироксена, появление калиевого полевого шпата (рис. 8). При давлении 12 кбар для обоих массивов моделируется появление граната, смещение поля кристаллизации плагиоклаза в более низкотемпературную область. Для массива

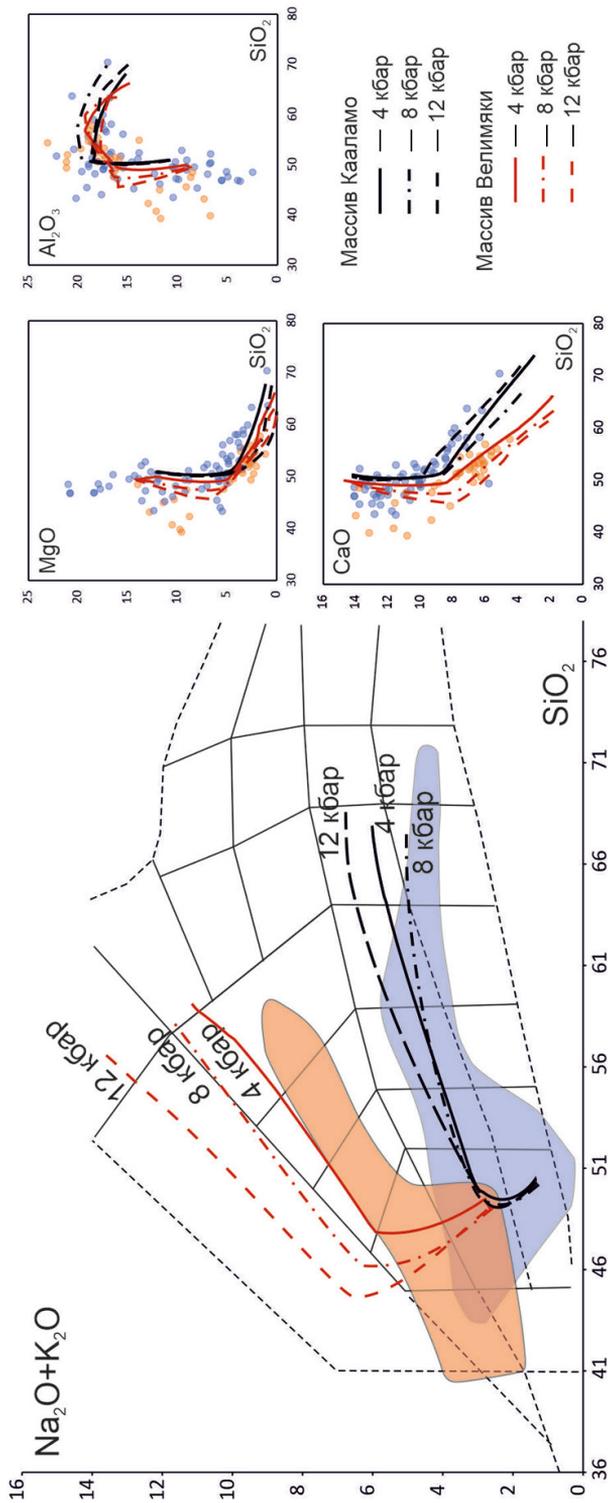


Рис. 7. Модельные тренды эволюции остаточных расплавов массива Кааламо (черные линии) и Велимяки (красные линии) при различном давлении (модель 3). Поля такие же, как на рис. 6

Кааламо моделируется практически полное исчезновение ортопироксена и шпинели, для массива Велимяки — дальнейшее уменьшение поля кристаллизации оливина, исчезновение биотита, появление апатита.

*Модель № 4* — тестирование возможности образования двух серий пород при разном содержании воды в исходных расплавах.

Для проверки данной модели была рассчитана фракционная кристаллизация при вариации содержания воды в расплаве от 1 до 5 вес. %. В качестве материнских расплавов массивов Кааламо и Велимяки взяты составы пород, которые воспроизводили последовательность минералов, наиболее приближенную к реальной (см. табл. 2). Прочие параметры были взяты аналогично модели № 1: давление — 4 кбар, кислородный буфер — QFM.

*Результаты.* Увеличение содержания воды в расплаве смещает тренд в менее щелочную область (рис. 9). При этом для магм обоих массивов моделируется уменьшение температуры ликвидуса, увеличение поля кристаллизации оливина, смещение поля кристаллизации плагиоклаза в более низкотемпературную область (рис. 10). В массиве Кааламо моделируется исчезновение пижонита, в массиве Велимяки — ортопироксена.

*Модель № 5* — тестирование возможности образования пород двух массивов из одного материнского расплава, кристаллизация происходила при различных кислородных буферах и фугитивности кислорода.

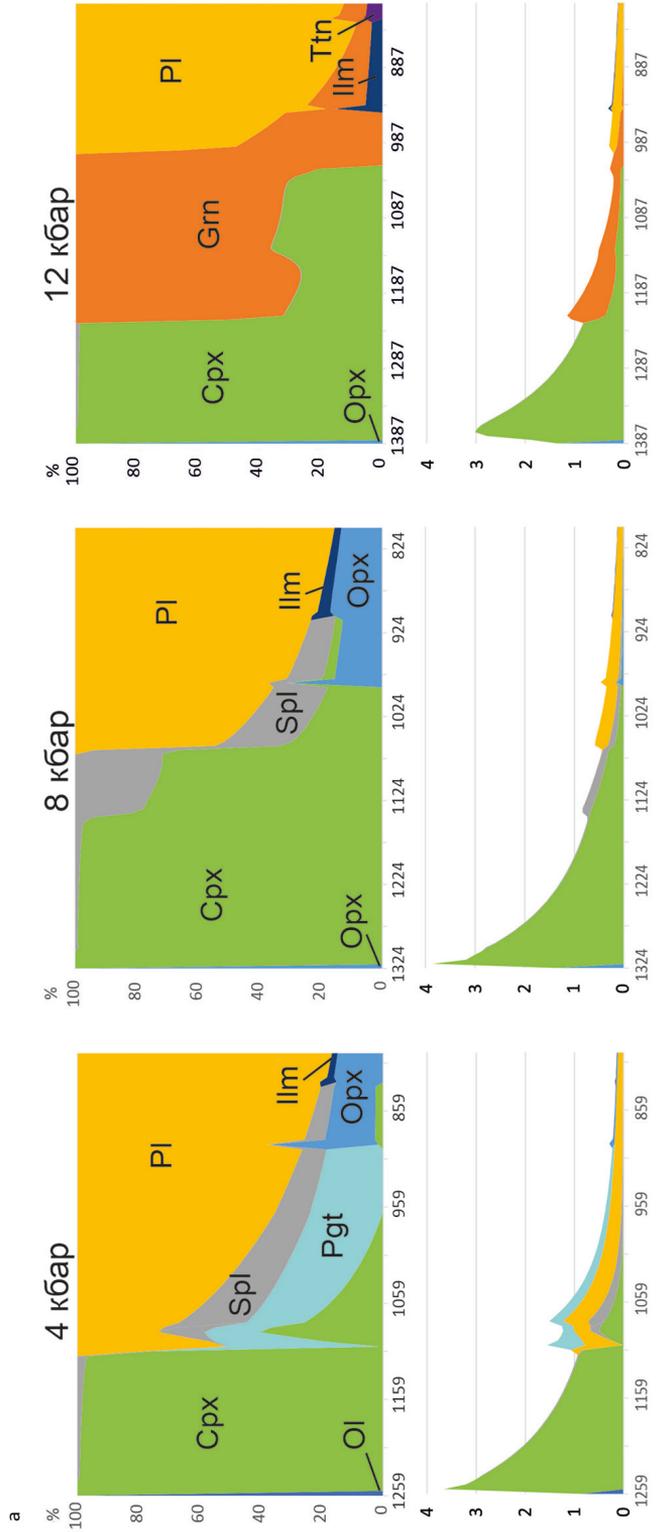
Для проверки данной модели была рассчитана фракционная кристаллизация при разной фугитивности кислорода с кислородными буферами: IW, QFM, NNO, НМ. Содержание воды в расплаве принималось равным 1 вес.%, а давление — 4 кбар. В качестве материнских расплавов массивов Кааламо и Велимяки взяты составы пород, которые воспроизводили последовательность минералов, наиболее приближенную к реальной (см. табл. 2).

*Результаты.* Увеличение фугитивности кислорода смещает тренд в менее щелочную область, а уменьшение — в более щелочную, однако, чтобы ощутимо изменить положение тренда составов, требуется существенное изменение фугитивности (рис. 11). При низкой фугитивности кислорода (кислородный буфер IW) для обоих массивов моделируется кристаллизация железистого оливина, Al-клинопироксена, для массива Кааламо — граната (рис. 12). Характерно практически полное отсутствие шпинели. При высокой фугитивности кислорода (кислородный буфер НМ) отмечается кристаллизация большого количества шпинели, а также гематита вместо ильменита.

## 6. Обсуждение результатов

Анализ описанных выше моделей позволяет сделать вывод о том, что нельзя получить субщелочной тренд пород массива Велимяки из расплава, образовавшего массив Кааламо, путем изменения таких параметров, как давление, содержание воды в расплаве, фугитивность кислорода. Также незначительна роль контаминации расплавов, если предполагать, что она происходила в верхней коре — на глубине формирования магматической камеры.

Для того чтобы сместить фигуративные точки составов пород с тренда нормальной щелочности (массив Кааламо) в более щелочную область, требуется либо



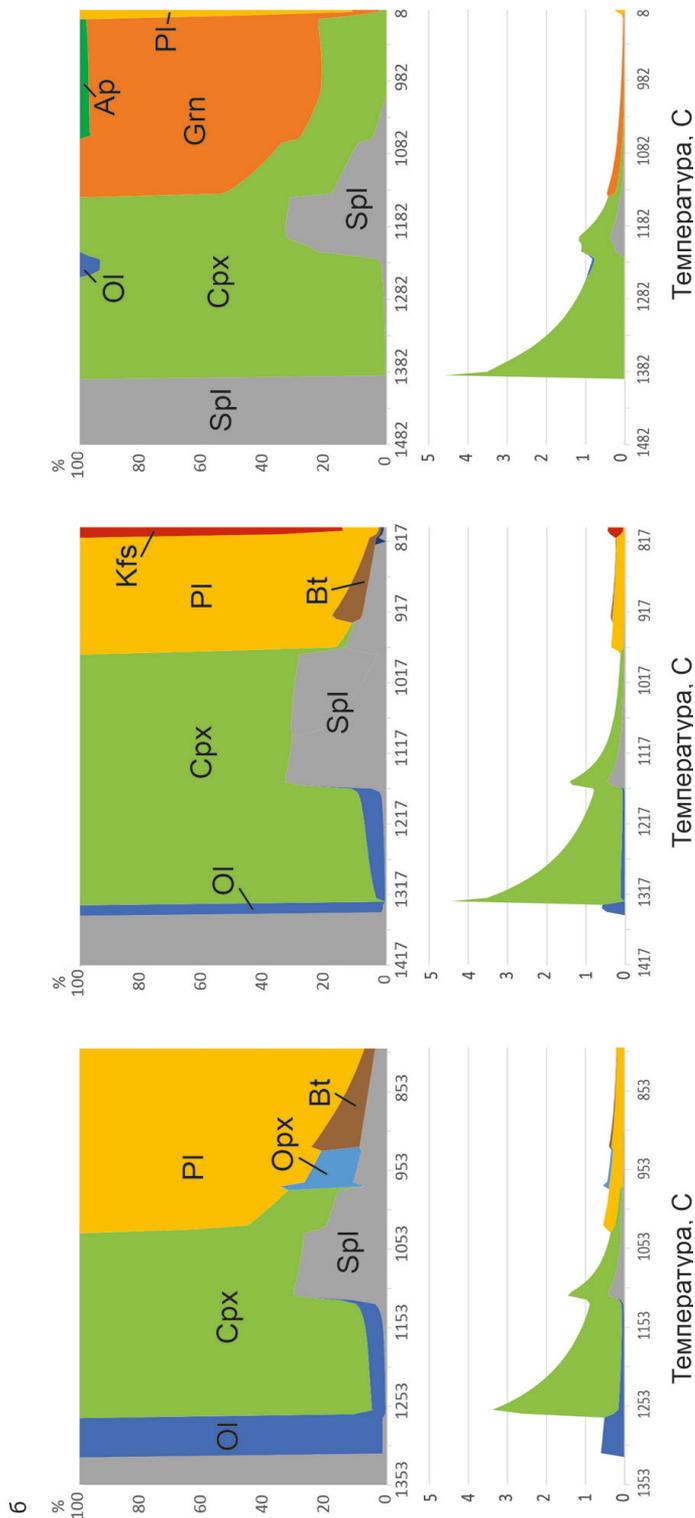


Рис. 8. Порядок кристаллизации минералов при различном давлении (модель 3):

а — массив Кааламо; б — массив Велимяки. По оси ординат на верхних рисунках указана доля минералов в вес. %, кристаллизовавшихся из расплава, на нижних рисунках — их масса

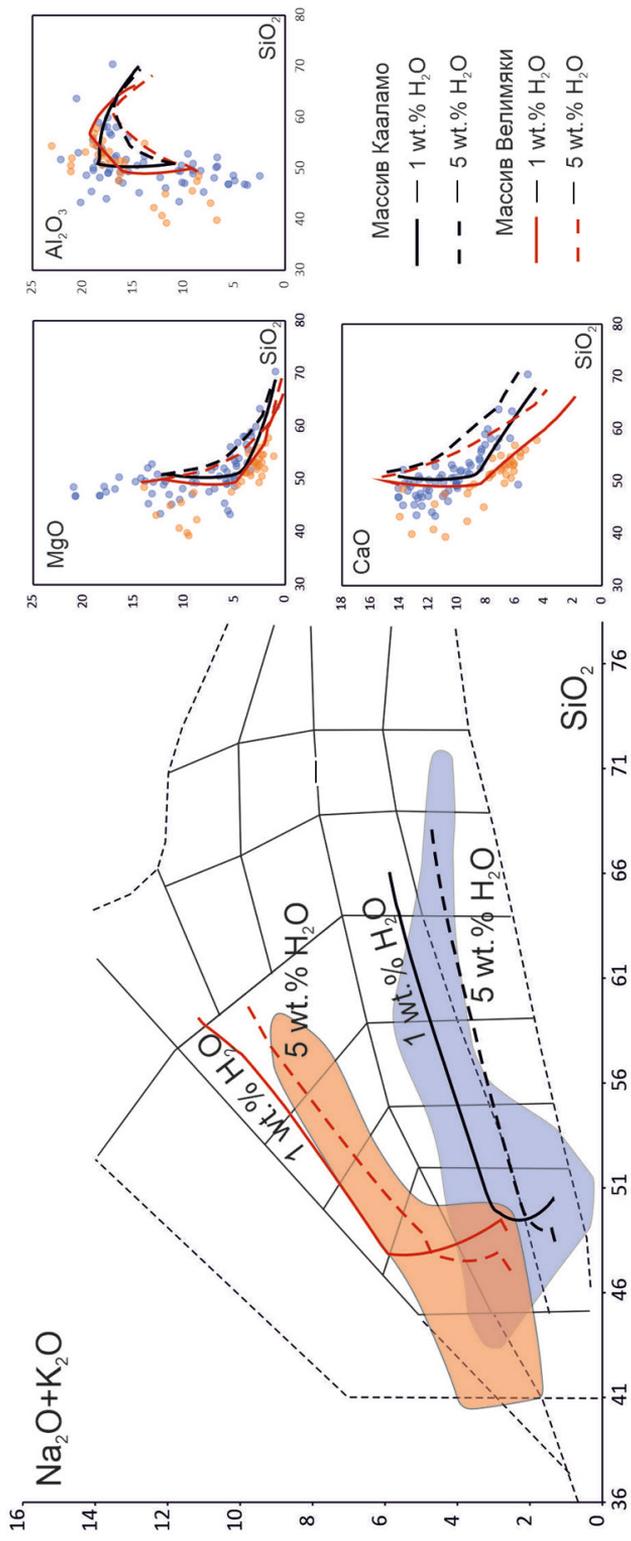


Рис. 9. Модельные тренды эволюции остаточных расплавов массива Кааламо (черные линии) и массива Велимаяки (красные линии) при различном содержании воды в расплаве (модель 4). Поля такие же, как на рис. 6

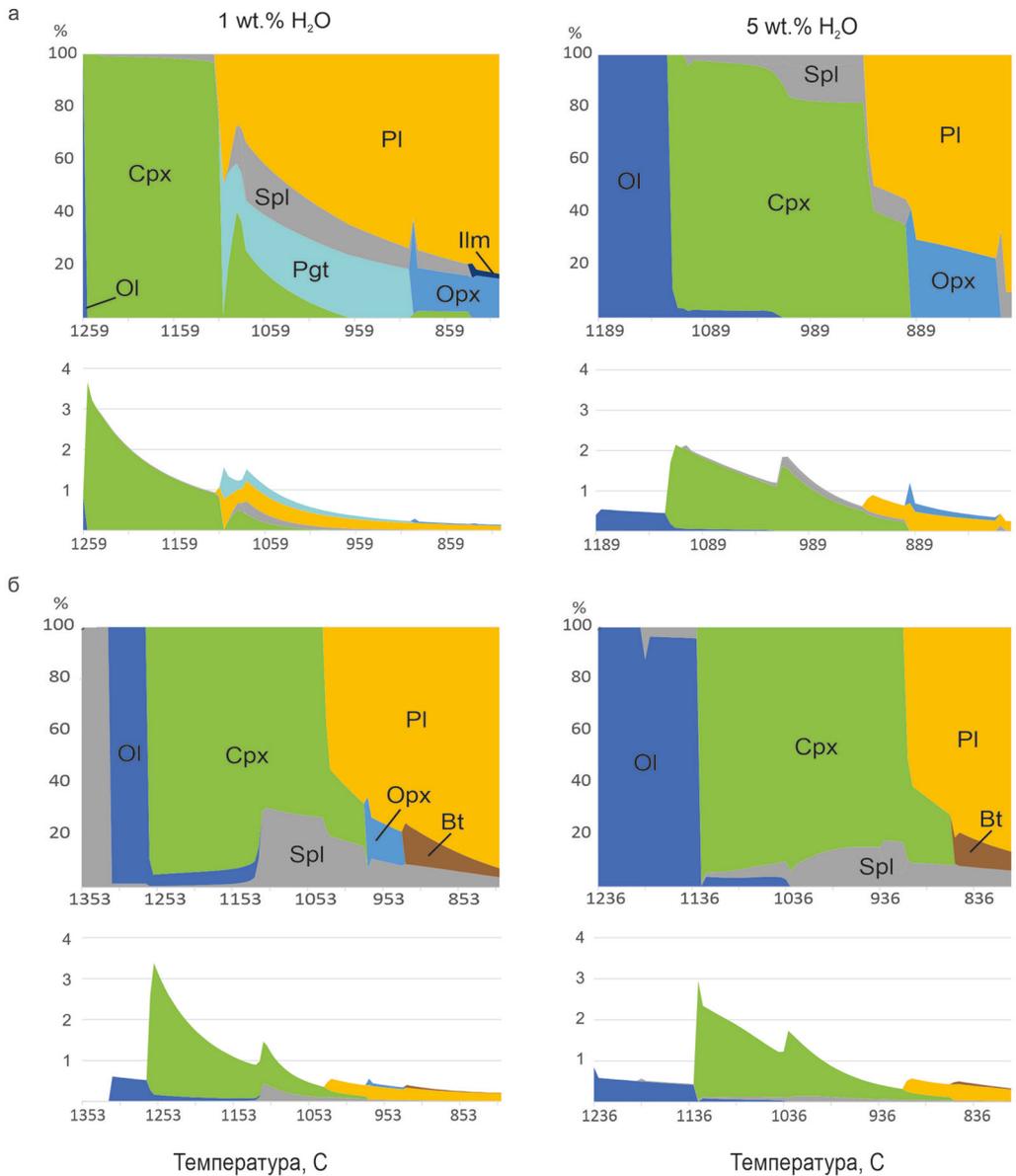


Рис. 10. Порядок кристаллизации минералов при различном содержании воды в расплаве (модель 4): а — массив Кааламо; б — массив Велимяки. Условные обозначения такие же, как на рис. 6

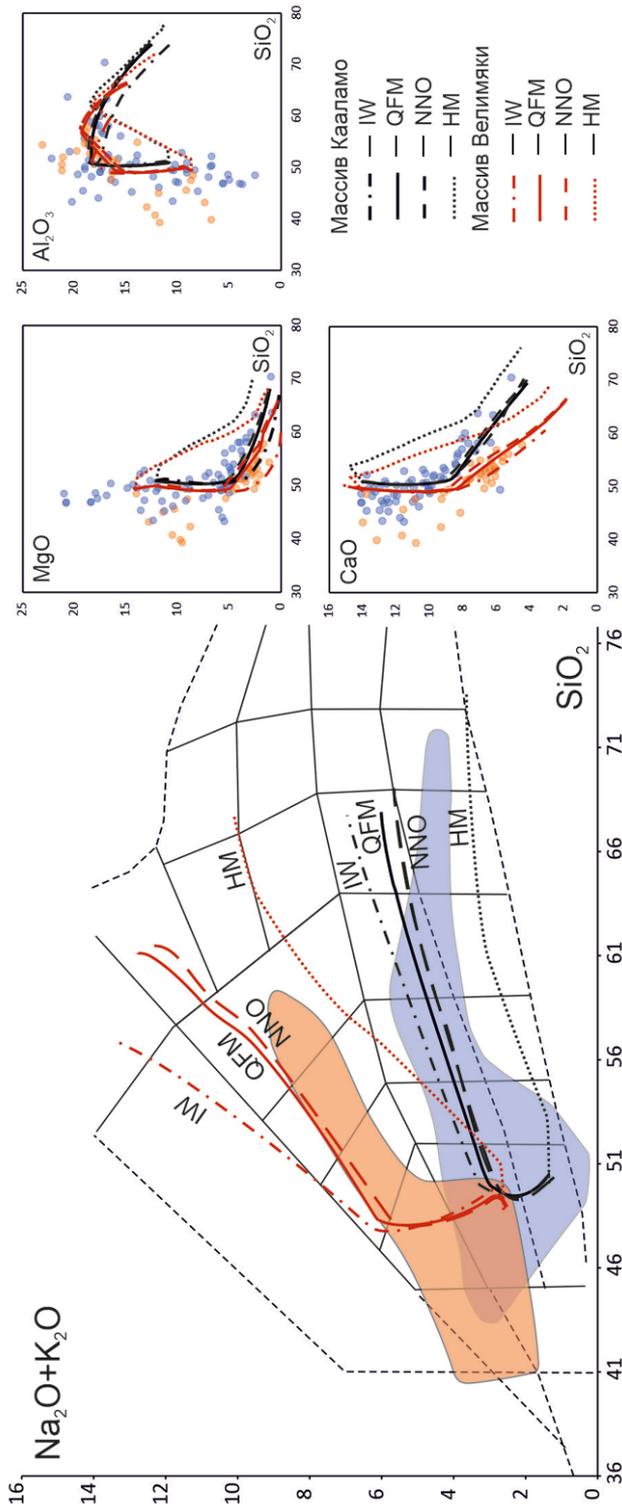


Рис. 11. Модельные тренды эволюции остаточных расплавов массива Кааламо (черные линии) и массива Велимяки (красные линии) при различной фугитивности кислорода (модель 5): IW — железо-вюстит; QFM — кварц-фаялит-магнетит; NNO — никель-оксид никеля; HM — гематит-магнетит. Поля такие же, как на рис. 6

увеличение давления (а значит, глубины становления массива), либо уменьшение содержания воды в расплаве, либо уменьшение фугитивности кислорода, либо контаминация. Однако в каждом из этих случаев в отдельности смещение тренда не столь значительно, чтобы привести к появлению серии субщелочных пород, характерных для пород массива Велимяки.

Увеличение давления может работать как фактор, сдвигающий тренд в субщелочную область, однако в данном случае его вряд ли приемлемо использовать. Учитывая такие геологические данные, как наличие реликтовых порфировидных структур в массиве Велимяки, можно сделать предположение, наоборот, о менее глубинном, «гипабиссальном» становлении массива (Богачев и др., 1999б). Наличие зоны закалки и находки роговиков в окружении массива Кааламо (Саранчина, 1949) также говорят об относительно неглубоком положении магматической камеры.

Уменьшение фугитивности кислорода настолько, чтобы это ощутимо повлияло на положение тренда, приведет к появлению в породах таких минералов, как Al-клинопироксен и железистый оливин ( $\text{Fe}_{50}$  и более), которые в массиве Велимяки не наблюдаются. Кроме того, при низкой фугитивности кислорода подавляется кристаллизация магнетита, а как раз в массиве Велимяки известны породы с содержанием магматического магнетита до 30 % (Саранчина, 1948).

Уменьшение содержания воды в расплаве приводит к появлению ортопироксена в породах массива Велимяки, хотя этот минерал, в отличие от массива Кааламо, в массиве Велимяки не наблюдается. Кроме того, обилие биотита в породах массива Велимяки, а также наличие предположительно магматической роговой обманки позволяет предположить, что магма массива Велимяки была, наоборот, более водонасыщена по сравнению с магмой массива Кааламо. Поэтому вряд ли применима модель относительной сухости расплавов, образующих породы массива Велимяки.

Надо отметить, что кристаллизация калиевого полевого шпата, являющегося одним из породообразующих минералов массива Велимяки, моделируется для пород богатых кремнеземом (монцодиориты и монцониты) при использовании rhyolite-MELTS 1.1.0. В этой версии программы, более подходящей для анализа систем с двумя полевыми шпатами, кристаллизация калиевого полевого шпата происходит при всех применяемых параметрах тестирования: содержании воды в расплаве от 1 до 5 вес. % и давлении от 4 до 12 кбар.

Таким образом, наиболее вероятен вывод об образовании дифференцированных серий пород кааламского и велимякского комплексов и одноименных массивов из различных материнских расплавов. Здесь следует иметь в виду то, что породы кааламского комплекса более дифференцированы по сравнению с породами велимякского комплекса. Из этого также следует, что предыстория эволюции составов расплавов сравниваемых комплексов и массивов отличается. Но при этом нельзя исключать, что первичный расплав у двух сравниваемых массивов мог быть общим на уровне глубинных (мантийных) резервуаров. Контаминация коровым веществом могла оказать заметное влияние на состав магмы массива Велимяки до достижения ею уровня верхней коры, где сформировалась магматическая камера. Для уточнения этого вопроса необходимо привлечение изотопно-геохимических данных.

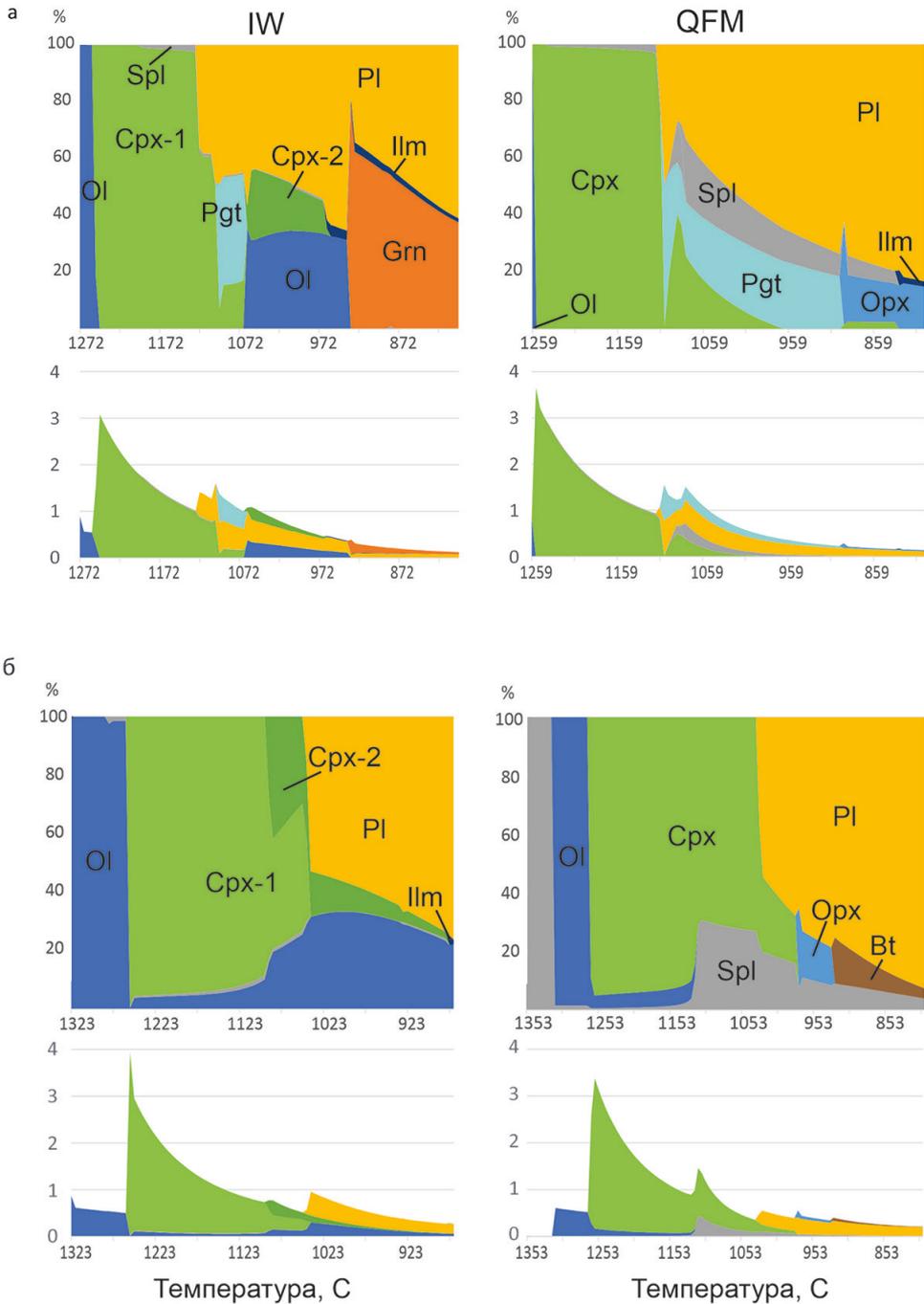
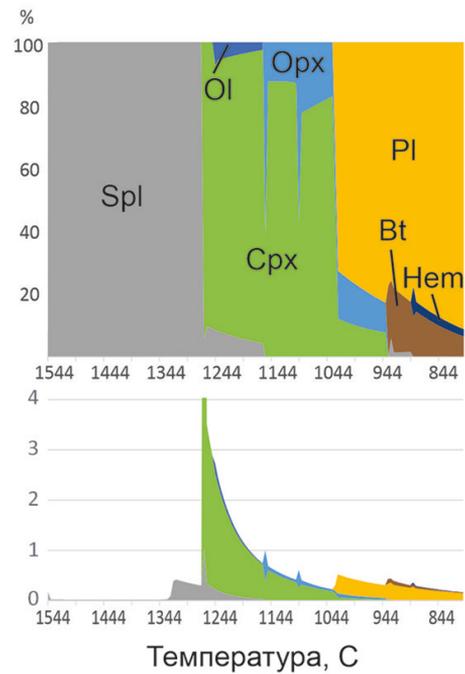
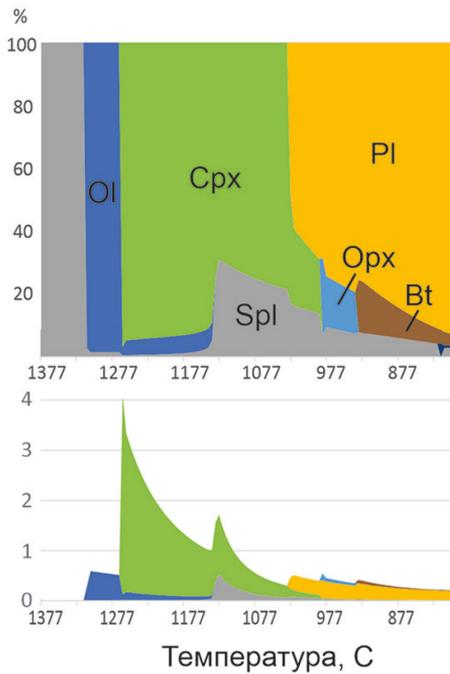
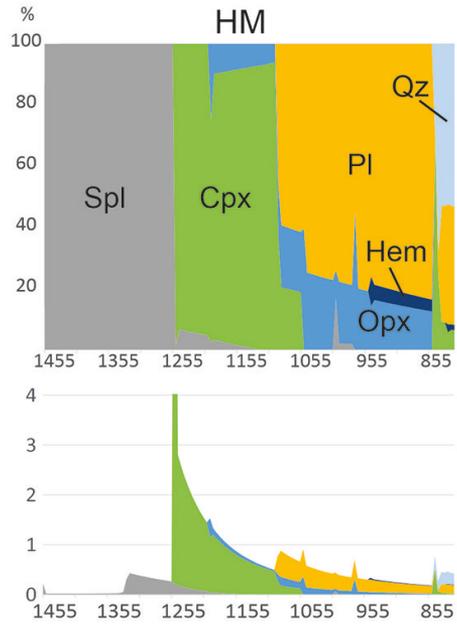
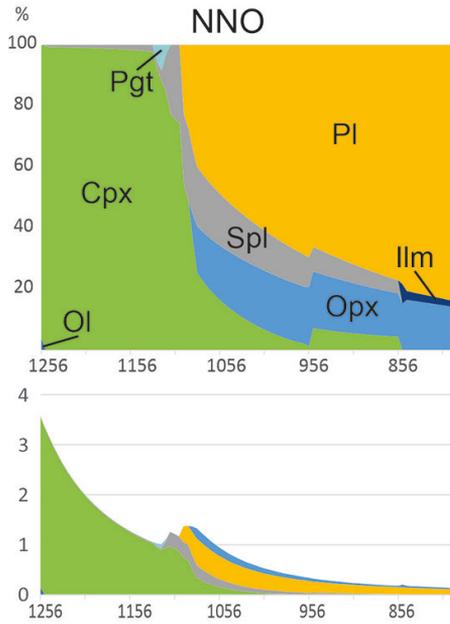


Рис. 12. Порядок кристаллизации минералов при различной фугитивности кислорода (модель 5):  
 а — массив Кааламо; б — массив Велияки; IW — железо-вюстит; QFM — кварц-фаялит-магнетит;  
 NNO — никель-оксид никеля; HM — гематит-магнетит. Условные обозначения такие же, как на рис. 6



## 7. Выводы

Дифференцированную субщелочную серию пород массива Велимяки не получить из магмы массива Кааламо путем допустимого изменения таких параметров кристаллизации, как давление, содержание воды в расплаве, фугитивность кислорода. Предположение о значительном различии указанных параметров для магм массивов Кааламо и Велимяки не находит подтверждения на минералого-петрографическом уровне и при рассмотрении других характеристик пород сравниваемых массивов.

Влияние контаминации на уровне магматической камеры не влияет существенно на состав магмы и не сдвигает тренд составов пород из области нормальной щелочности в субщелочную.

Массивы кааламского и велимякского комплексов, скорее всего, сформировались из различных материнских расплавов, но если их родоначальный расплав и был общим, то магма массива Велимяки претерпела контаминацию с обогащением щелочами по пути миграции магмы до достижения уровня верхней коры.

## Литература

- Алексеев, И. А. (2008). *Геология и рудоносность массива Вялимяки (Северное Приладожье)*. Дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Санкт-Петербургский государственный университет.
- Алексеев, И. А. и Котова, И. К. (2010). Геологическое строение и рудоносность массива Вялимяки (Северное Приладожье). В: В. С. Абушкевич, Н. А. Алфимова, под ред., *Сборник трудов молодых ученых ИГГД РАН*. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 47–82.
- Алексеев, И. А. и Кулешевич, Л. В. (2017). Благороднометаллическая минерализация массива Вялимяки (Северное Приладожье, Карелия). *Труды Карельского научного центра РАН*, 2, 60–72. <https://doi.org/10.17076/geo115>
- Анисимов, Р. Л., Кириллова, П. А., Петракова, М. Е., Балтыбаев, Ш. К. (2021). Раннепротерозойские кааламский и велимякский магматические комплексы Северного Приладожья: источники и эволюция магм. *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*, 18, 20–25. <https://doi.org/10.31241/FNS.2021.18.004>
- Балтыбаев, Ш. К., Глебовицкий, В. А., Козырева, И. В., Конопелько Д. Л., Левченков, О. А., Седова, И. С., Шульдинер, В. И. (2000). *Геология и петрология свекофеннид Приладожья*. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та.
- Богачев, В. А., Иваников, В. В., Козырева, И. В., Конопелько, Д. Л., Левченков, О. А., Шульдинер, В. И. (1999а). U-Pb цирконовое датирование синорогенных габбро-диоритовых и гранитоидных интрузий Северного Приладожья. *Вестник СПбГУ*, 3, 23–31.
- Богачев, В. А., Иваников, В. В., Филиппов, Н. Б. (1999б). *Выделение петролого-геохимических этапов магматических комплексов как индикаторов палеогеодинамических обстановок в Ладожской структурной зоне для геодинамического анализа при ГДП-200* [отчет]. СПб.: Фонды СЗРГЦ.
- Борисова, Е. Б. и Балтыбаев, Ш. К. (2021). Петрохимические критерии появления ставролита в метапелитах при среднетемпературном метаморфизме низких и средних давлений. *Петрология*, 29 (4), 536–551.
- Ивашенко, В. И., Лавров, О. Б., Кондрашова, Н. И. (1998). Рудная минерализация малых интрузий кааламского типа СЗ Приладожья. *Геология и полезные ископаемые Карелии*, 1, 51–57.
- Ивашенко, В. И. и Голубев, А. И. (2011). *Золото и платина Карелии: Формационно-генетические типы оруденения и перспективы*. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН.
- Лавров, О. Б. и Кулешевич, Л. В. (2016). Перспективы поисков платиноидов в массивах Кааламского дифференцированного комплекса (Северное Приладожье, Карелия). *Отечественная геология*, 3, 46–56.
- Ладожская протерозойская структура (геология, глубинное строение и минералогия)* (2020). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН.

- Лобач-Жученко, С. Б., Чекулаев, В. П., Байкова, В. С. (1973). *Эпохи и типы гранитообразования в докембрии Балтийского щита*. Л.: Наука.
- Макарова, Г. В. (1967). *Отчет о геолого-съёмочных работах масштаба 1:50 000, проведенных Сортавальской партией в Сортавальском районе КАССР в 1964–65 гг.* [отчет]. Петрозаводск: Фонды КГЭ.
- Макарова, Г. В. (1971). *Отчет о геолого-поисковых работах на медь, никель и кобальт, проведенных Тохмайокской партией в Северном Приладожье КАССР в 1969–70 гг.* [отчет]. Петрозаводск: Фонды КГЭ.
- Саранчина, Г. М. (1948). Петрология Велимякской интрузии и связанное с нею рудопроявление. *Известия Карело-Финской научно-исследовательской базы АН СССР*, 2, 32–42.
- Саранчина, Г. М. (1949). Петрология Кааламской интрузии (юго-западная Карелия). *Известия Карело-Финской научно-исследовательской базы АН СССР*, 2, 57–80.
- Светов, А. П., Свириденко, Л. П., Иващенко, В. И. (1990). *Вулкано-плутонизм свекокарелид Балтийского щита*. Петрозаводск: КарНЦ РАН.
- Свириденко, Л. П., Семенов, А. С., Никольская, Л. Д. (1976). Кааламский массив габброидов и плагиогранитов. В: К. О., Кратц, под ред., *Интрузивные базит-ультрабазитовые комплексы докембрия Карелии*. Л.: Наука, 127–140.
- Шарпенюк, Л. Н., Костин, А. Е., Кухаренко, Е. А. (2013). TAS-диаграмма сумма щелочей — кремнезем для химической классификации и диагностики плутонических пород. *Региональная геология и металлогения*, 56, 40–50.
- Asimow, P. D. and Ghiorso, M. S. (1998). Algorithmic Modifications Extending MELTS to Calculate Subsolvus Phase Relations. *American Mineralogist*, 83, 1127–1131.
- Bohrson, W. A., Spera, F. J., Ghiorso, M. S., Brown, G. A., Creamer, J. B., Mayfield, A. (2014). Thermodynamic model for energy-constrained open-system evolution of crustal magma bodies undergoing simultaneous recharge, assimilation and crystallization: the magma chamber simulator. *Journal of Petrology*, 55, 1685–1717. <https://doi.org/10.1093/петроlogy/egu036>
- Ghiorso, M. S. and Gualda, G. A. R. (2015). An H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> mixed fluid saturation model compatible with rhyolite-MELTS. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 169 (6), 53. <https://doi.org/10.1007/s00410-015-1141-8>
- Ghiorso, M. S., Hirschmann, M. M., Reiners, P. W., Kress, V. C. (2002). The pMELTS: An revision of MELTS aimed at improving calculation of phase relations and major element partitioning involved in partial melting of the mantle at pressures up to 3 GPa. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3 (5), 1–36. <https://doi.org/10.1029/2001GC000217>
- Ghiorso, M. S. and Sack, R. O. (1995). Chemical Mass Transfer in Magmatic Processes. IV. A Revised and Internally Consistent Thermodynamic Model for the Interpolation and Extrapolation of Liquid-Solid Equilibria in Magmatic Systems at Elevated Temperatures and Pressures. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119, 197–212.
- Gualda, G. A. R., Ghiorso, M. S., Lemons, R. V., Carley, T. L. (2012). Rhyolite-MELTS: A modified calibration of MELTS optimized for silica-rich, fluid-bearing magmatic systems. *Journal of Petrology*, 53, 875–890. <https://doi.org/10.1093/петроlogy/egr080>
- Hackman, V., ed. (1929). *Sortavalan seudun kivilaaikartta, scale 1:150 000: geologisen toimikunnan julkaisema*.
- Kärenlampi, K., Heinonen, J. S., Kontinen, A., Hanski, E., Huhma, H. (2021). Geochemical and thermodynamic modeling of the petrogenesis of A1-type granites and associated intermediate rocks: A case study from the central Fennoscandian Shield. *Geochemistry*, 81 (2), 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125734>
- Whitney, D. L. and Evans, B. W. (2010). Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95, 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>

Статья поступила в редакцию 29 октября 2022 г.

Статья рекомендована к печати 20 марта 2023 г.

#### Контактная информация:

Анисимов Роман Леонидович — romjulleoanis@mail.ru

Петракова Марина Евгеньевна — maribya@mail.ru

Балтыбаев Шаукет Каимович — shauket@mail.ru

# Kaalamo and Velimyaki paleoproterozoic gabbroid massifs of the Northern Ladoga area: Thermodynamic modeling of crystallization and evolution trends of igneous rocks\*

R. L. Anisimov<sup>1</sup>, M. E. Petrakova<sup>1</sup>, Sh. K. Baltybaev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the Russian Academy of Sciences, 2, nab. Makarova, St. Petersburg, 199034, Russian Federation

<sup>2</sup> St. Petersburg State University,

7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

**For citation:** Anisimov, R. L., Petrakova, M. E., Baltybaev, Sh. K. (2023). Kaalamo and Velimyaki paleoproterozoic gabbroid massifs of the Northern Ladoga area: Thermodynamic modeling of crystallization and evolution trends of igneous rocks. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 68 (2), 265–292. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2023.204> (In Russian)

Kaalamo and Velimyaki gabbroid massifs are located in the south-eastern part of the Raaheladoga suture zone of the Karelian craton and the Svecofennian mobile belt. These massifs were formed almost simultaneously 1.89 Ga ago, occupy the same tectonic position and are located in a single unit of the Early Proterozoic metamorphosed rocks: the intrusions are contained by the Early Proterozoic supracrustal stratas: garnet-biotite gneisses and micaceous shales of the Ladoga series, as well as amphibolites of the Sortavala series. Despite this, the gabbroids of the compared massifs differ sharply in their material composition, especially the content of alkalis in a differentiated series of rocks. The results of thermodynamic modeling of magmatic crystallization (Magma Chamber Simulator, MELTS packages) showed that a differentiated sub-alkaline series of rocks of the Velimyaki massif cannot be obtained from magma of the Kaalamo massif by slightly changing such parameters as pressure, water content in the melt, and oxygen fugacity. The assumption of a significant difference in these parameters for magmas of the Kaalamo and Velimyaki massifs is not confirmed at the mineralogical-petrographic level and other characteristics of the rocks of the compared ones. The effect of contamination at the level of the magma chamber also does not significantly shift the trend of rock compositions from the calc-alkaline region to the sub-alkaline region. Analysis of the results of thermodynamic modeling of magmatic mineral formation in the two massifs allows us to make it possible to conclude that the Kaalamo and Velimyaki massifs were formed either from various parent melts, or their initial melt was one, but the magma of the Velimyaki massif underwent contamination with enrichment with alkalis along the migration route of magma until the level of the upper crust was reached.

**Keywords:** paleoproterozoic, Svecofennian belt, gabbroids, thermodynamic modeling, MCS, MELTS.

## References

- Alekseev, I. A. (2008). *Geology and ore content of the Vyalimyaki massif (Northern Ladoga area)*. PhD thesis. St. Petersburg State University. (In Russian)
- Alekseev, I. A. and Kotova, I. K. (2010). Geological structure and ore content of the Vyalimyaki massif (Northern Ladoga area). In: V. S. Abushkevich, N. A. Alfimova, eds, *Sbornik trudov molodykh uchenykh IGGD RAN*. St. Petersburg: Izdatel'stvo Politekhnicheskogo universiteta Publ., 47–82. (In Russian)
- Alekseev, I. A. and Kuleshevich, L. V. (2017). Precious metal mineralization of the Vyalimyaki massif (Northern Ladoga area, Karelia). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2, 60–72. <https://doi.org/10.17076/geo115> (In Russian)

---

\* This work was funded by the Research Project of the Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the Russian Academy of Sciences (no. FMUW-2022-0002) of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

- Anisimov, R. L., Kirillova, P. A., Petrakova, M. E., Baltybaev, S. K. (2021). Kaalamo and velimyaky early-proterozoic magmatic complexes of the Northern Ladoga area: sources and evolution of magmas. *Trudy Fersmanovskoj nauchnoj sessii GI KNC RAN*, 18, 20–25. <https://doi.org/10.31241/FNS.2021.18.004> (In Russian)
- Asimow, P. D. and Ghiorso, M. S. (1998). Algorithmic Modifications Extending MELTS to Calculate Subsolidus Phase Relations. *American Mineralogist*, 83, 1127–1131.
- Baltybaev, Sh. K., Glebovitsky, V. A., Kozyreva, I. V., Konopelko D. L., Levchenkov, O. A., Sedova, I. S., Schuldiner, V. I. (2000). *Geology and petrology of the Svecofennidae of the Ladoga region*. St. Petersburg: St. Petersburg University Press. (In Russian)
- Bogachev, V. A., Ivanikov, V. V., Kozyreva, I. V., Konopelko, D. L., Levchenkov, O. A., Schuldiner, V. I. (1999a). U-Pb zircon dating of synorogenic gabbro-diorite and granitoid intrusions in the Northern Ladoga area. *Vestnik SPbGU*, 3, 23–31. (In Russian)
- Bogachev, V. A., Ivanikov, V. V., Filippov, N. B. (1999b). *Identification of petrological and geochemical standards of igneous complexes as indicators of paleogeodynamic settings in the Ladoga structural zone for geodynamic analysis during the ГДП-200* [report]. St. Petersburg: Fondy severo-zapadnogo regional'nogo geologicheskogo tsentra. (In Russian)
- Bohrson, W. A., Spera, F. J., Ghiorso, M. S., Brown, G. A., Creamer, J. B., Mayfield, A. (2014). Thermodynamic model for energy-constrained open-system evolution of crustal magma bodies undergoing simultaneous recharge, assimilation and crystallization: the magma chamber simulator. *Journal of Petrology*, 55, 1685–1717. <https://doi.org/10.1093/petrology/egu036>
- Borisova, E. B. and Baltybaev, Sh. K. (2021). Petrochemical criteria for the appearance of staurolite in metapelites during low and medium pressure medium temperature metamorphism. *Petrologiia*, 29 (4), 536–551. (In Russian)
- Ghiorso, M. S. and Gualda, G. A. R. (2015). An H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> mixed fluid saturation model compatible with rhyolite-MELTS. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 169 (6), 53. <https://doi.org/10.1007/s00410-015-1141-8>
- Ghiorso, M. S., Hirschmann, M. M., Reiners, P. W., Kress, V. C. (2002). The pMELTS: An revision of MELTS aimed at improving calculation of phase relations and major element partitioning involved in partial melting of the mantle at pressures up to 3 GPa. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3 (5), 1–36. <https://doi.org/10.1029/2001GC000217>
- Ghiorso, M. S. and Sack, R. O. (1995). Chemical Mass Transfer in Magmatic Processes. IV. A Revised and Internally Consistent Thermodynamic Model for the Interpolation and Extrapolation of Liquid-Solid Equilibria in Magmatic Systems at Elevated Temperatures and Pressures. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119, 197–212.
- Gualda, G. A. R., Ghiorso, M. S., Lemons, R. V., Carley, T. L. (2012). Rhyolite-MELTS: A modified calibration of MELTS optimized for silica-rich, fluid-bearing magmatic systems. *Journal of Petrology*, 53, 875–890. <https://doi.org/10.1093/petrology/egr080>
- Hackman, V., ed. (1929). *Sortavalan seudun kivilaajikartta: Geologisen toimikunnan julkaisema 1:150000*.
- Ivashchenko, V. I., Lavrov, O. B., Kondrashova, N. I. (1998). Ore mineralization of small intrusions of the Kaalamo type in NW Ladoga region. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii*, 1, 51–57. (In Russian)
- Ivashchenko, V. I. and Golubev, A. I. (2011). *Gold and platinum of Karelia: Formation-genetic types of mineralization and prospects*. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. (In Russian)
- Kärenlampi, K., Heinonen, J. S., Kontinen, A., Hanski, E., Huhma, H. (2021). Geochemical and thermodynamic modeling of the petrogenesis of A1-type granites and associated intermediate rocks: A case study from the central Fennoscandian Shield. *Geochemistry*, 81 (2), 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125734>
- Lavrov, O. B. and Kuleshevich, L. V. (2016). Platinoid prospecting in the massifs of the Kaalamo differentiated complex (Northern Priladozhye, Karelia). *Otechestvennaia geologiya*, 3, 46–56. (In Russian)
- Lobach-Zhuchenko, S. B., Chekulaev, V. P., Baikova, V. S. (1973). *Epochs and types of granite formation in the Precambrian of the Baltic Shield*. Leningrad: Nauka Publ. (In Russian)
- Makarova, G. V. (1967). *Report on geological survey work, scale 1: 50,000, carried out by the Sortavala party in the Sortavala region of the KASSR in 1964–65* [report]. Petrozavodsk: Fondy KGE Publ. (In Russian)

- Makarova, G. V. (1971). *Report on resources investigation on copper, nickel and cobalt carried out by the Tok-maioksky party in Northern Ladoga area of the KASSR in 1969–70* [report]. Petrozavodsk: Fondy KGE Publ. (In Russian)
- Proterozoic Ladoga structure (geology, deep structure and mineral genesis)* (2020). Petrozavodsk: Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. (In Russian)
- Saranchina, G. M. (1948). Petrology of the Velimiyaki intrusion and associated ore occurrence. *Izvestiia Karelo-Finskoi nauchno-issledovatel'skoi bazy AN SSSR*, 2, 32–42. (In Russian)
- Saranchina, G. M. (1949). Petrology of the Kaalamo intrusion (southwestern Karelia). *Izvestiia Karelo-Finskoi nauchno-issledovatel'skoi bazy AN SSSR*, 2, 57–80. (In Russian)
- Sharpenok, L. N., Kostin, A. E., Kukharenko, E. A. (2013). TAS-diagram the amount of alkalis — silica for chemical classification and diagnosis of plutonic rocks. *Regional'naiia geologiia i metallogeniia*, 56, 40–50. (In Russian)
- Svetov, A. P., Sviridenko, L. P., Ivashchenko, V. I. (1990). Volcano-plutonism of the Svekokarelids of the Baltic Shield. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. (In Russian)
- Sviridenko, L. P., Semenov, A. S., Nikolskaya, L. D. (1976). Kaalamo massif of gabbroids and plagiogranites. In: K. O. Kratz, ed., *Intruzivnye bazit-ul'trabazitovye komplekсы dokembriia Karelii*. Leningrad: Nauka Publ., 127–140. (In Russian)
- Whitney, D. L., Evans, B. W. (2010). Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95, 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>

Received: October 29, 2022

Accepted: March 20, 2023

#### Authors' information:

Roman L. Anisimov — [romjulleoanis@mail.ru](mailto:romjulleoanis@mail.ru)

Marina E. Petrakova — [maribya@mail.ru](mailto:maribya@mail.ru)

Shauket K. Baltybaev — [shauket@mail.ru](mailto:shauket@mail.ru)