

УДК 552.3

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАССЛОЕННОСТИ МАФИТ-УЛЬТРАМАФИТОВЫХ ИНТРУЗИВОВ ОЛАНГСКОЙ ГРУППЫ, СЕВЕРНАЯ КАРЕЛИЯ

© 2022 г. А. Р. Цховребова^{а, *}, Е. В. Коптев—Дворников^б, Д. А. Бычков^б

^аИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

^бМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Москва, Россия

*e-mail: tsann3@gmail.com

Поступила в редакцию 01.04.2022 г.

После доработки 30.04.2022 г.

Принята к публикации 18.05.2022 г.

Олангская группа — компактный исследовательский полигон для проверки петрогенетических концепций. Несмотря на возрастную и пространственную близость три интрузива имеют разный состав исходных магм, различные наборы кумулятивных парагенезисов, различное внутреннее строение и характер ритмической расслоенности. С помощью кластерного анализа содержаний главных элементов восстановлены кумулятивные парагенезисы в изохимически измененных горных породах Ципрингского и Луккулайсваарского массивов. В строении разрезов массивов Кивакка и Ципринга, несмотря на разный состав исходных магм и разный порядок кристаллизации, имеет место четкое разделение на зоны по кумулятивным парагенезисам, на границах зон наблюдается ограниченное развитие ритмического переслаивания (с мощностью ритмов от первых метров до первых десятков метров). В противоположность этому в Луккулайсваарском интрузиве нет четкого выделения кумулятивных зон, и по всей мощности массива установлено крупномасштабное ритмическое переслаивание (мощности ритмов от первых десятков до первых сотен метров). Возможно, различный характер ритмичности в трех интрузивах отражает разные сценарии внутрикамерной конвекции магм.

Ключевые слова: мафит-ультрамафитовые интрузивы, кластерный анализ, ритмическая расслоенность, распределение Sr, Ni

DOI: 10.31857/S0869590322060097

ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемая публикация продолжает начатое Я.В. Бычковой совместно с Е.В. Коптевым—Дворниковым изучение объективных количественных характеристик ритмической расслоенности в интрузивах Олангской группы.

Ритмическая расслоенность мафит-ультрамафитовых и щелочных плутонов является одним из самых загадочных проявлений магматической эволюции. К проблеме ее формирования можно относиться двояко. С одной стороны — это, пусть и интересная, но частная проблема образования расслоенных интрузивов — далеко не самых распространенных объектов в земной коре. С другой стороны, значение самих расслоенных интрузивов для петрологии отнюдь не пропорционально их распространенности. К ним следует относиться как к самым глубинным магматическим образованиям, в которых можно непосредственно наблюдать результаты магматической эволюции *in situ*. Выводы о механизмах формирования расслоен-

ных интрузивов можно распространить и на процессы, происходящие в ненаблюдаемых камерах под вулканами. С этих позиций генетическая концепция, которая, помимо общих закономерностей строения расслоенных интрузивов, способна объяснить и происхождение ритмичности, может претендовать на ведущую роль в учении о магматической эволюции в целом. Одновременно механизм формирования ритмической расслоенности является важной прикладной проблемой, поскольку в расслоенных интрузивах рудные горизонты, обогащенные хромитом или титаномагнетитом, или благородными металлами, как правило, приурочены к ритмически расслоенным пачкам пород.

Главная генетическая проблема ритмической расслоенности — необходимость на фоне **монотонного** остывания и кристаллизации интрузива предложить реалистичный с физической и физико-химической точек зрения процесс, который приводил бы к формированию многократно повто-

ряемой последовательности слоев пород, отвечающих различным, не всегда последовательным, стадиям фракционирования материнской магмы.

Сложность проблемы усугубляется тем, что характеристики самого феномена весьма непостоянны. По-видимому, этим обстоятельством обусловлено то, что число конкурирующих гипотез формирования ритмической расслоенности подбирается к двум десяткам (их обзор и анализ выполнены в ряде обобщающих работ (например, Ярошевский, 1970; Namug et al., 2015). С этих позиций представляется полезным сравнить изученные закономерности ритмической расслоенности в Киваккском массиве с особенностями этого феномена в двух других интрузивах Олангской группы. Выбор этих объектов для сравнительного исследования определяется их компактным географическим расположением, близким возрастом, общей геолого-тектонической обстановкой и соизмеримыми мощностями. В то же время эти массивы по результатам предыдущих исследований (Коптев—Дворников и др., 2001; Семенов и др., 1995; Glebovitsky et al., 2001) различаются наборами кумулатов и, вероятно, различным содержанием флюидных компонентов.

Массив Кивакка имеет особое значение в исследованиях ультраосновных и основных расслоенных комплексов. Уровень геологической, петрографической и геохимической изученности интрузива, хорошая обнаженность пород его вертикального разреза, включая зоны контакта, слабое проявление вторичных изменений, логичное и соответствующее ожиданиям распределение элементов — все это делает массив Кивакка представителем классического дифференцированного комплекса. Опираясь на своего рода эталон, выявление особенностей и уникальных черт двух соседствующих массивов — Луккулайсваары и Ципринги — становится более эффективным и корректным.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ И ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ИНТРУЗИВОВ ОЛАНГСКОЙ ГРУППЫ

В Северной Карелии в 1931 г. Ю.С. Неуструевым была обнаружена цепь расслоенных перидотит-габброноритовых интрузий, объединенных в Олангскую группу. Интрузивы Олангской группы (в нее входят Киваккский, Луккулайсваарский и Ципрингский массивы (Клюнин и др., 1994; Лавров, 1979; Семенов и др., 1995; Шмыгалев, 1968)) приурочены к региональной зоне субширотных разломов и являются восточной ветвью протяженного пояса расслоенных массивов, западная ветвь которого продолжается на территорию Финляндии (Alapieti, 1982).

Вмещающими породами для этих интрузивов являются мигматизированные биотитовые и ам-

фиболовые гнейсы, гранитогнейсы и гранодиоритогнейсы верхнего архея (Turchenko и др., 1991). По отношению к ним интрузивы дискордантны. Они обладают автономной внутренней структурой и расслоенностью, свидетельствующей об их формировании в условиях стабилизации вмещающей среды (Лавров, 1979; Семенов и др., 1995). В более поздние этапы геологического развития массивы вместе с вмещающими породами были наклонены от первоначального залегания на 35° — 80° , испытали незначительные дизъюнктивные нарушения, рассланцевание и амфиболизацию краевых частей.

Интрузивы обладают крупными размерами, их характерной особенностью является дифференцированность и расслоенность (Богачев и др., 1968).

В основу крупномасштабной стратиграфии расслоенных серий во всех трех интрузивах положен принцип кумулятивных парагенезисов. В соответствии с законами кристаллизации многокомпонентных систем, на диаграммах плавкости с понижением температуры переход из области кристаллизации избыточной фазы на двойную, тройную и т.д. котектики сопровождается увеличением числа кристаллизующихся фаз (за исключением перитектик). Таким образом, направление, в котором происходит увеличение числа минералов в кумулусе, отражает направление заполнения интрузивной камеры твердыми фазами, а последовательность смены кумулятивных парагенезисов — порядок кристаллизации материнской магмы.

ИНТРУЗИВ КИВАККА

Киваккский интрузив находится на северо-западном берегу оз. Пяозеро. Изотопные определения возраста пород интрузива дали следующие значения: 2420 ± 23 млн лет (Sm-Nd метод) и 2444 ± 1 млн лет (U-Pb метод) (Амелин, Семенов, 1990; Барков и др., 1991; Amelin, Semenov, 1996).

Строение Киваккского интрузива характеризуется резко выраженной расслоенностью (рис. 1). В плане слои в виде полос сменяют друг друга от юго-восточной придонной части массива к северо-западной апикальной. В целом внутреннее строение массива характеризуется сменой ультрамафитовых пород габброидами при движении с юго-востока на северо-запад (от подошвы интрузива к его кровле). Видимая мощность массива в центральной части достигает ~2000 м (Коптев—Дворников и др., 2001).

В пределах массива установлен ряд разломов северо-западного, поперечного к слоистости, простирания. Наиболее крупный из них отделяет юго-западную часть интрузива. Максимальная амплитуда смещения по нему достигает 500 м.

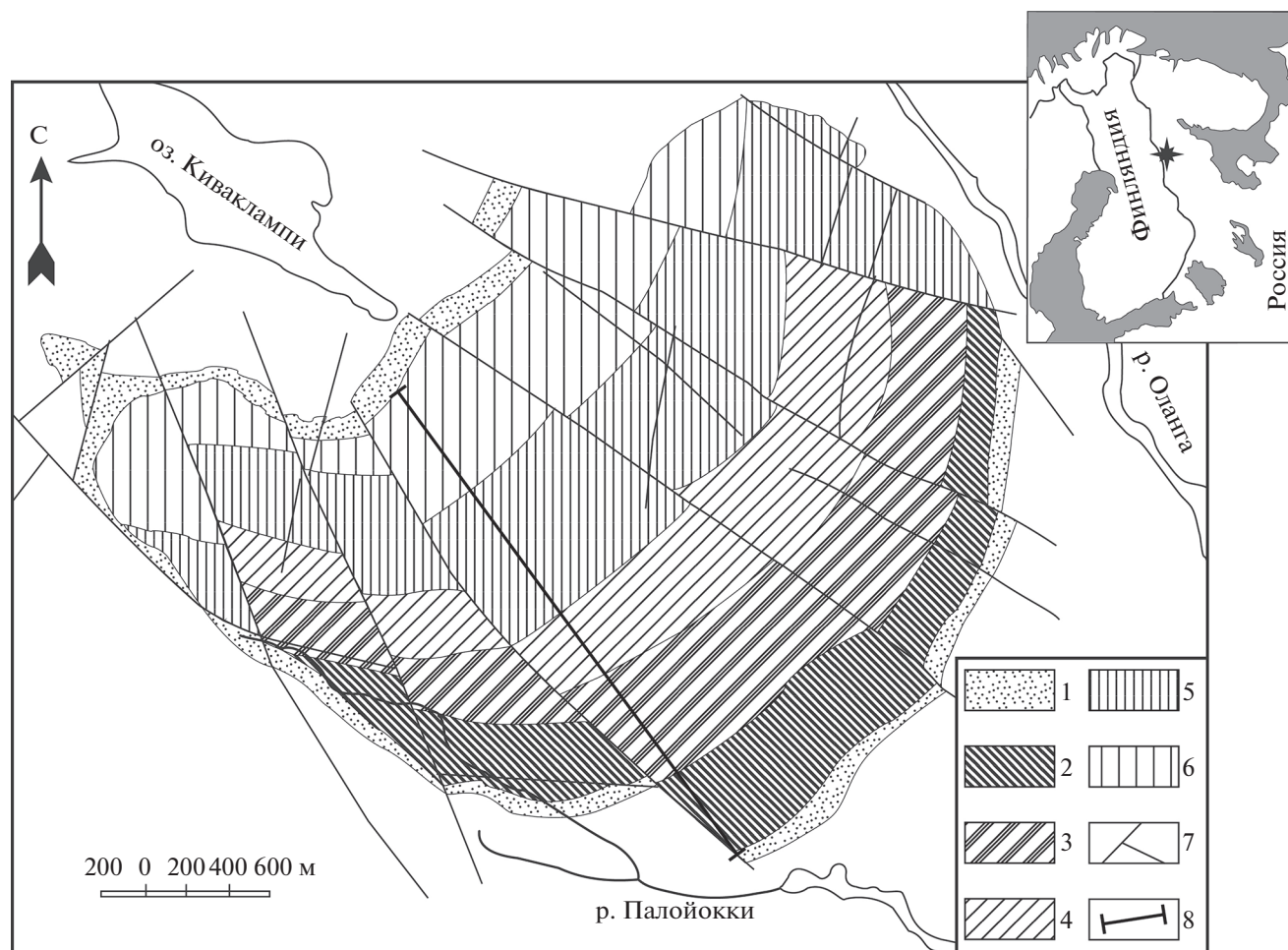


Рис. 1. Схема геологического строения Кивакского интрузива.

1 – нижняя и верхняя приконтактные зоны; 2 – оливинитовая зона; 3, 4 – норитовая зона (3 – подзона переслаивания бронзититов и норитов); 5 – габброноритовая зона; 6 – зона габброноритов с пижонитом; 7 – разрывные нарушения; 8 – профиль пробоотбора (по материалам Коптев–Дворников и др., 2001).

Внешние очертания интрузива допускают интерпретацию его первоначальной формы как вертикального опрокинутого конуса с углом при вершине около 80° и высотой около 3.9 км. Впоследствии интрузив был наклонен на северо-запад под углом 36° и частично эродирован.

Геологические наблюдения, петрографические, петрохимические и геохимические данные (Коптев–Дворников и др., 2001; Лавров, 1979) выявили в разрезе верхнюю и нижнюю приконтактные зоны и расслоенную серию, которая составляет основной объем интрузива.

Нижняя приконтактная зона сложена преимущественно придонными габброноритами мощностью не более 100 м. Снизу вверх по разрезу наблюдается переход к расслоенной серии через переслаивание от габброноритов к оливинитам. Мощность участка переслаивания составляет 15 м.

Видимая мощность расслоенной серии достигает около 1900 м, снизу вверх в ней выделяют зоны

оливинитов, норитов, габброноритов и габброноритов с претерпевшим инверсию пижонитом в качестве ромбического пироксена:

1. Оливинитовая зона¹ залегает в основании расслоенной серии. Преобладающим кумулятивным минералом в зоне является оливин. Породы характеризуются наличием текстурных неоднородностей, а также вариациями зернистости. Мощность оливинитовой зоны составляет 400 м. В верхних 50 м заметную роль играет кумулятивный бронзит. Переход к вышележащей норитовой зоне происходит через переслаивание гарцбургитов и бронзититов (мощность переслаивания 20–30 м).

2. Норитовая зона достигает мощности 700 м. Кумулятивными минералами в зоне являются бронзит и плагиоклаз. Нижние 400 м норитовой зоны представлены среднemasштабным ритмиче-

¹ Название пород этой зоны определяется отсутствием в их составе хромшпинелида.

ским переслаиванием меланократовых и мезо-лейкократовых норитов и выделены в подзону переслаивания бронзититов и норитов. Породы характеризуются существенной неоднородностью не только количественно-минерального состава, но и контрастными текстурными рисунками сопряженных прослоев. Через весь интрузив прослеживается маркирующий горизонт крупнозернистых меланократовых норитов, представляющих рыхлый бронзитовый кумулат. Он перекрывается мощной толщей относительно однородных мезо-лейкократовых норитов.

3. Выше по разрезу залегает габброноритовая зона, сложенная в основном габброноритами, породами с трехминеральным бронзит-плагиоклаз-авгитовым кумулятивным парагенезисом. Она характеризуется относительной однородностью пород как по количественно-минеральному составу, так и по текстурно-структурным характеристикам. Мощность зоны около 420 м.

4. Самым верхним подразделением расслоенной серии является зона габброноритов с инвертированным пижонитом в качестве низкокальциевого пироксена. Ее мощность составляет 320 м. Слагающие ее породы слабо отличаются по химическому составу от нижележащих габброноритов, однако кумулятивный ортопироксен сменяется претерпевшим инверсию пижонитом.

Завершается расслоенная серия наиболее дифференцированными породами, для которых традиционно используется название “сэндвичевый горизонт”.

Выше этого горизонта залегают породы верхней приконтактной зоны. Они характеризуются неустойчивой мощностью до 50 м и представлены эпидотизированными габброноритами.

Характер наблюдавшихся границ между переслаивающимися породами резкий, но фациальный. Нигде не зафиксировано присутствие закалочных зон и разрывных нарушений, следов тектонических деформаций пород и минералов на границах переслаивающихся пород (Коптев–Дворников и др., 2001).

Смена кумулятивных парагенезисов снизу вверх в разрезе Киваккского интрузива, происходила в следующем порядке: оливин → оливин + ортопироксен → ортопироксен + плагиоклаз → ортопироксен + плагиоклаз + клинопироксен → клинопироксен + плагиоклаз + пижонит.

Ритмической расслоенности в Киваккском интрузиве посвящено специальное исследование (Бычкова и др., 2007; Бычкова, Коптев–Дворников, 2004; Бычкова, 2003). Детальное геологическое описание выявило два типа переслаивающихся пород: 1) сантиметровая расслоенность мощностью порядка первых сантиметров; 2) метровая расслоенность мощностью до первых десятков метров. Прослой сантиметровой расслоенности характе-

ризуются невыдержанной мощностью, выклиниваются по простиранию, нередко имеют нечеткие границы, в результате чего им определена роль явлений второго порядка, осложняющих основную ритмичность. Слои метровой расслоенности с четкими резкими, но не секущими границами прослежены по простиранию как минимум на 800 м. Установлено, что ритмическое переслаивание пород в Киваккском интрузиве сопровождается появлением каждого нового кумулятивного минерала в вертикальном разрезе. Внутри ритма слои отличаются кумулятивными парагенезисами.

По итогам исследования контрастной расслоенности киваккского типа была предложена многослойно-суспензионная понятийная модель ее формирования, допускающая построение численной системной проверяемой модели (Бычкова, Коптев–Дворников, 2004). Мы предположили, вслед за рядом исследователей (Wager, Deer, 1939; Френкель и др., 1988; Трубицын, Харыбин, 2012 и др.), что конвекция может возникать в результате образования в градиентной зоне кристаллизации у кровли суспензии более плотной, чем нижежащая, и струйного погружения на дно этой смеси кристаллов и расплава как целого. Важным концептуальным результатом М.Я. Френкеля стало понимание того, что струи погружающейся суспензии не обязательно достигают поверхности кумулуса. Если в толще магмы существует вертикальный градиент плотности (не обязательно линейный), то отдельные струи могут приобрести нулевую плавучесть на некотором промежуточном уровне и растечься по горизонтали в виде слоя.

Таким образом, возможно возникновение многослойной системы, когда в матрице одноминеральной суспензии (расплав + 1 тв. фаза) на разных уровнях в порядке уменьшения плотности снизу вверх располагаются слои более фракционированных двух- и даже трехминеральных суспензий.

ИНТРУЗИВ ЛУККУЛАЙСВААРА

Интрузив Луккулайсваара прорывают гранито-гнейсы с возрастом 2702 ± 84 млн лет (U-Pb) и перекрыт он метаморфизованными в условиях фации зеленых сланцев базальными конгломератами и вулканитами с возрастом 2432 ± 22 млн лет (U-Pb). Возраст самого массива составляет 2442 ± 1 млн лет (Семенов и др., 1997; Amelin et al., 1995; Amelin, Semenov, 1996; Turchenko et al., 1991).

Интрузив представляет наклоненное под углом $\sim 45^\circ$ к северу тело, имеющее очертание неправильного эллипса (рис. 2). Краевые его части перекрыты чехлом четвертичных отложений (Богачев и др., 1968). Мощность интрузива ~ 4.6 км.

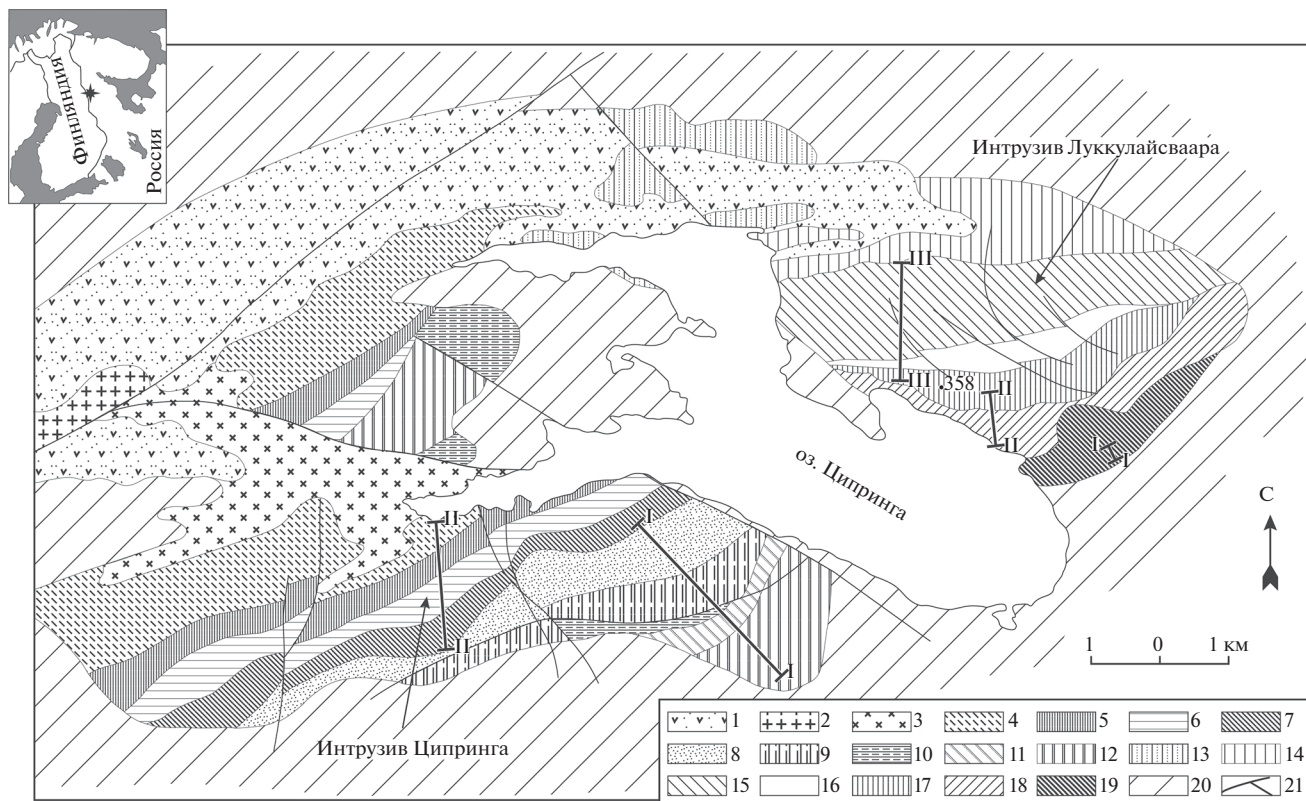


Рис. 2. Схема геологического строения района оз. Ципринга. Линии I, II, III – профили геохимического опробования. 1 – метавулканиты (2.4 млрд лет), 2 – граниты, 20 – гранито-гнейсы и мигматиты фундамента (2.6–2.7 млрд лет), 21 – разрывные нарушения. *Расслоенный интрузив Ципринга:* 3 – монцодиориты; зона магнетитовых габброноритов: 4 – габбронориты и магнетитосодержащие габбронориты, 5 – переслаивание габброноритов и магнетитовых габброноритов; 6 – зона габброноритов; 7 – зона оливиновых габбро; зона троктолитов: 8 – подзона лейкократовых троктолитов-анортозитов, 9 – подзона мезократовых троктолитов; нижняя приконтактная зона: 10 – габбро-пегматиты, 11 – лейкократовые троктолиты-анортозиты, 12 – переслаивание троктолитов, оливиновых габбро и габброноритов, магнетитосодержащих габброноритов. *Расслоенный интрузив Луккулайсваара:* 13 – нерасчлененные толщи расслоенного комплекса; 14 – верхняя краевая зона: переслаивание норитов и габброноритов; 15 – зона габброноритов II; 16 – зона норитов II; 17 – зона габброноритов I; 18 – зона норитов I; 19 – зона переслаивания оливинитов, дунитов, гарцбургитов и бронзититов (по материалам Семенов и др., 1995).

Предыдущими исследованиями (Glebovitsky и др., 2001) в массиве выделены нижняя и верхняя приконтактные зоны, а породы расслоенной серии по набору кумулятивных минералов делятся на пять зон:

1. Зона ультраосновных пород, которая представлена переслаиванием оливинитов, гарцбургитов и бронзититов. Ортопироксен встречается в форме ойкокрсталлов с хадакрсталлами оливина и хромита.

2. Зона норитов I сложена в основном меланократовыми норитами. Оливин встречается спорадически как второстепенный минерал.

3. Зона габброноритов I, характерной чертой последних является наличие линз мелко-микрoзернистых габброноритов и норитов, быстро выклинивающихся слоев пятнистых анортозитов и оливинсодержащих меланократовых норитов и

гарцбургитов, пойкилитовых норитов и пироксенитов.

4. Зона норитов II, представленная лейкократовыми норитами-анортозитами.

5. Зона габброноритов II.

К границе расслоенной серии с перекрывающей верхней приконтактной зоной приурочен сэндвичевый горизонт.

Отличительной особенностью Луккулайсваарского интрузива является наличие вложенных в расслоенность многочисленных тел микрогабброноритов. Крупное тело микрогабброноритов мощностью до 100 м залегает в средней части массива (Богачев и др., 1968; Glebovitsky и др., 2001).

Набор кумулатов, определенный по некоторым относительно слабо измененным породам, сохранивших реликты первичномагматических минералов либо диагностируемые псевдоморфозы по ним, близок к набору кумулатов Кивакского массива.

В пределах Луккулайсваарского массива отмечены спорадические участки тонкой (сантиметровой) ритмической расслоенности, как правило, приуроченные к областям присутствия тел микрогабброноритов. Выдержанная по простиранию ритмичность метровой мощности, подобная обнаруженной в Кивакском интрузиве, предыдущими исследованиями не установлена.

ИНТРУЗИВ ЦИПРИНГА

Интрузив Ципринга расположен с юго-западной стороны оз. Ципринга. В плане массив имеет удлиненную форму, вытянутую в восточном–северо-восточном направлении (рис. 2). Длина составляет 11 км, ширина – 5–8 км (Шмыгалев, 1968).

По изотопным данным U-Pb и Sm-Nd систем возраст массива составляет 2441.3 ± 1.7 и 2430 ± 26 млн лет соответственно (Семенов и др., 1995).

Комплекс залегает в зоне контакта гранитоидов верхнего архея, диоритов и гранитов, которые перекрываются осадочно-вулканогенными образованиями панааярвинской свиты нижнего протерозоя (Шмыгалев, 1968).

В интрузиве имеется отчетливо проявленная слоистость, которая ориентирована под углом $\sim 65^\circ$. Значительная часть пород массива сильно изменена (Семенов, 2012).

В разрезе выделяются верхняя и нижняя приконтактные зоны и расслоенная серия, составляющая основной объем интрузива (Семенов и др., 1995). Так, с юга на север выделяют:

1. Нижняя приконтактная зона мощностью 400 м, которая в нижней части представлена переслаиванием габброноритов, оливиновых габбро, лейкотроктолитов, а в верхней – лейкотроктолитами до анортозитов, габброноритами, а также наблюдаются линзы грубозернистых магнетитовых габброноритов и тела габбро-пегматитов.

2. Зона троктолитов с нижней мезотроктолитовой и верхней лейкотроктолитовой подзонами, мощность зоны 1350 м. Залегает в основании расслоенной серии. Основными минералами являются оливин и плагиоклаз. По соотношению этих минералов выделяются две подзоны:

Подзона мезотроктолитов – мощностью 640 м.

Подзона лейкотроктолитов – имеет мощность 710 м, к границе подзон приурочено переслаивание меланократовых и лейкократовых троктолитов мощностью около 10–15 м при мощности отдельных слоев порядка 0.1–0.2 м.

3. Зона оливиновых габбро мощностью 300 м с прослоями оливинсодержащих пижонитовых габброноритов. Представлена зона оливин-плагиоклаз-клинопироксеновым парагенезисом.

4. Зона габброноритов с инвертированным пижонитом в качестве ромбического пироксена, сложена плагиоклаз-клинопироксен-пижонитовыми кумулатами. Мощность 310 м.

5. Зона пижонитовых феррогабброноритов и магнетитовых габброноритов мощностью до 530 м. Нижние 140 м зоны представлены пачкой переслаивающихся габброноритов и магнетитовых габброноритов. Средняя часть – габброноритами с редкими прослоями магнетитсодержащих габброноритов, а верхняя часть сложена магнетитсодержащими габброноритами с отдельными прослоями габброноритов.

На границе между расслоенной серией и верхней приконтактной зоной расположены породы сэндвичевого горизонта.

6. Верхняя приконтактная зона имеет мощность около 200 м.

Мощность интрузива около 3100 м.

Смена кумулятивных парагенезисов в массиве Ципринга осуществлялась в следующем порядке: оливин + плагиоклаз → оливин + плагиоклаз + авгит → плагиоклаз + авгит + пижонит → плагиоклаз + авгит + пижонит + магнетит.

Тонкая (сантиметровая) ритмическая расслоенность в интрузиве обнаружена на границе лейкократовых и меланократовых троктолитов, т.е. не сопровождается изменением кумулятивных парагенезисов в сопряженных слоях.

Ритмичность метрового масштаба мощности установлена в верхней четверти разреза. Она сопряжена с появлением кумулятивного титаномагнетита и представлена чередованием слоев с кумулятивным титаномагнетитом и без него.

Таким образом три дифференцированных интрузива Олангской группы, несмотря на схожее тектоническое положение и близкий возраст, демонстрируют разные типы развития метровой ритмической расслоенности, чем и привлекли наше внимание.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Значительная часть пород интрузивов Ципринга и Луккулайсваара существенно изменена, поэтому петрографическое описание и выделение кумулятивных парагенезисов осложнено. В этих условиях для идентификации пород особое значение приобретают петрохимические данные по составу пород опорных разрезов.

Кластерный анализ представляет статистическую процедуру, в основе которой лежит классификация данных, содержащих набор информации о ряде объектов. Сформированный кластер можно охарактеризовать его внутригрупповой суммой квадратов отклонений, которая равна сумме квадратов расстояний от точек кластера до их средней

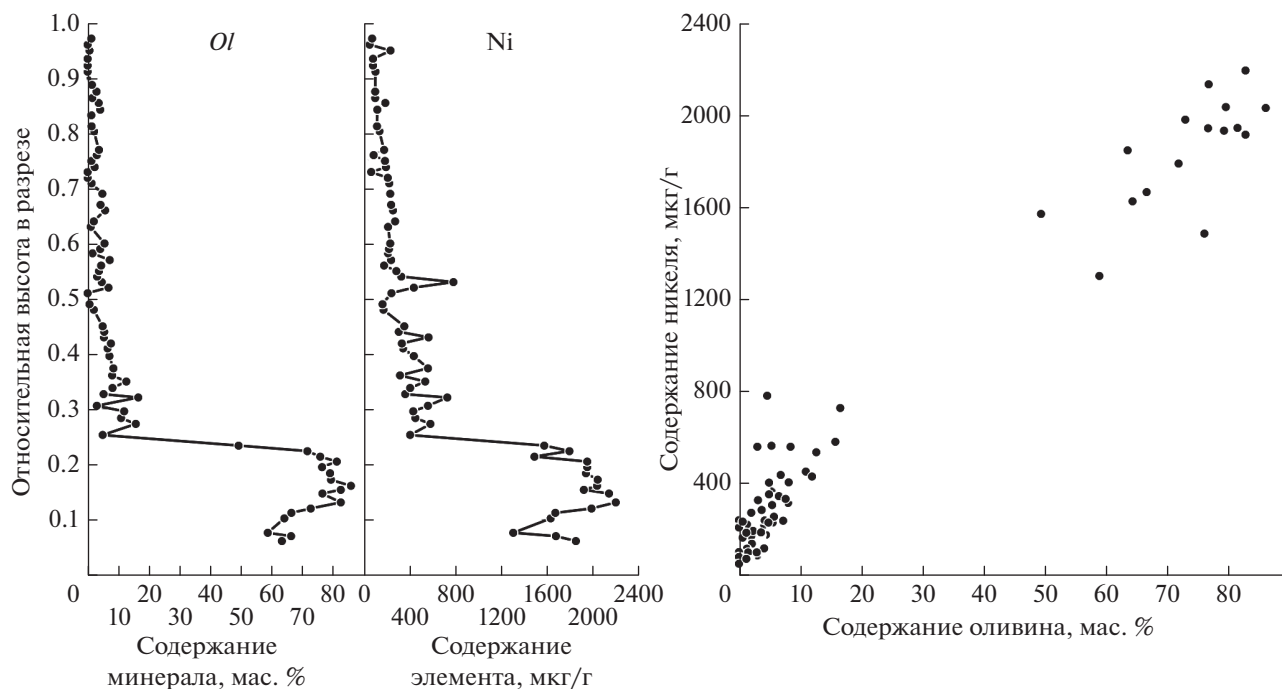


Рис. 3. Распределение содержаний оливина и никеля в вертикальном разрезе Киваккского интрузива и корреляция между ними.

величины (для измерения расстояний использовалась евклидова метрика). По этому методу при каждом последующем шаге объединяются два близко расположенных, т.е. наиболее схожих по параметрам, кластера и происходит минимизация внутригрупповых сумм квадратов. Для выделения петрохимически устойчивых групп пород авторы использовали один из вариантов иерархического кластерного анализа (Ward Jr, 1963), апробированный нами для классификации магматических пород и дополненный нормативным пересчетом составов пород, результаты которого приводятся в объемных процентах.

Условием корректного применения метода кластерного анализа для восстановления первично магматического количественно-минерального состава пород интрузивов Ципринга и Луккулайсвара является установление изохимической природы вторичных изменений исследуемых пород.

Доказательством того, что рассчитанные нормативные составы пород отвечают первичномагматическим (т.е., что процесс вторичных изменений носил изохимический характер), являются корреляции между концентрациями никеля, стронция и нормативными содержаниями их минералов-концентраторов (оливина и плагиоклаза, соответственно) в магматическом процессе.

Содержания никеля и стронция в породах массивов определены методом ИСП-МС в лаборатории кафедры геохимии Геологического факульте-

та МГУ с помощью масс-спектрометра с двойной фокусировкой Element-2 фирмы Thermo Scientific. Аналитики Бычкова Я.В., Панчева Т.В., Арьяева Н.С., Бычков Д.А., Цховребова А.Р., Гнучев Я.Ю. Пробы были подготовлены к анализу методом кислотного разложения (Бычкова и др., 2019). Результаты определения приведены в табл. 1.

Никель в породах в отсутствие сульфидов концентрируется в оливине, и взаимосвязь между их распределениями видна во всех трех интрузивах как на корреляционных графиках, так на графиках распределений никеля и оливина по высоте в разрезах массивов (рис. 3, 5, 7).

В породах массивов Кивакка и Луккулайсвара видны четкие корреляции содержаний стронция и нормативного плагиоклаза как относительно друг друга, так и по высоте в разрезах (рис. 4 и 6). В породах интрузива Ципринга несмотря на то, что корреляция между содержаниями стронция и плагиоклаза отсутствует, характер распределения содержаний по высоте в разрезе на рис. 8 не оставляет сомнений в том, что распределение Sr в массиве контролируется плагиоклазом.

Кроме вышеизложенного, во многих случаях специфика локализации вторичных минералов свидетельствует о том, что вторичные процессы протекали в условиях закрытой системы: по железомagneзиальным ортомагматическим минералам развивались железомagneзиальные вторичные ми-

Таблица 1. Содержания Ni и Sr в породах Киваккского, Луккулайсварского и Ципрингского интрузивов

Проба	H, м	H _{отн}	*	Содержание, мкг/г		Проба	H, м	H _{отн}	*	Содержание, мкг/г	
				Ni	Sr					Ni	Sr
Киваккский интрузив											
КВ-402	121.5	0.061	I	1840	48	КВ-443	1020	0.510	I	240	240
КВ-403	140	0.070	I	1670	86	КВ-444	1040	0.520	I	440	290
КВ-404	152	0.076	I	1300	22	КВ-445	1060	0.530	I	780	188
КВ-405	203.7	0.102	I	1620	24	КВ-446	1080	0.540	I	330	200
КВ-406	223	0.112	I	1660	25	КВ-447	1100	0.550	I	280	260
КВ-407	241	0.120	I	1980	40	КВ-448	1120	0.560	I	176	240
КВ-408	262	0.131	I	2190	41	КВ-449	1140	0.570	I	240	240
КВ-409	293	0.147	I	2130	38	КВ-450	1164	0.582	I	210	280
КВ-410	308	0.154	I	1910	33	КВ-451	1180	0.590	I	220	260
КВ-411	322	0.161	I	2030	36	КВ-452	1200	0.600	I	230	250
КВ-412	345	0.172	I	2030	27	КВ-455	1260	0.630	I	210	320
КВ-413	367	0.184	I	1930	50	КВ-456	1280	0.640	I	270	280
КВ-414	390	0.195	I	1940	37	КВ-458	1320	0.660	I	250	250
КВ-415	410	0.205	I	1940	45	КВ-459	1340	0.670	I	240	260
КВ-416	428	0.214	I	1480	44	КВ-461	1380	0.690	I	230	280
КВ-417	448	0.224	I	1790	52	КВ-463	1417	0.709	I	220	270
КВ-418	468	0.234	I	1570	30	КВ-464	1437	0.719	I	210	260
КВ-419	506	0.253	I	400	240	КВ-465	1458	0.729	I	64	390
КВ-421	546	0.273	I	580	52	КВ-466	1477	0.738	I	193	290
КВ-422	568	0.284	I	450	58	КВ-467	1498	0.749	I	185	300
КВ-423	593	0.296	I	430	60	КВ-468	1519	0.760	I	87	260
КВ-424	612	0.306	I	560	58	КВ-469	1538	0.769	I	176	290
КВ-425	642	0.321	I	730	42	КВ-472	1607	0.803	I	137	310
КВ-426	655	0.327	I	360	187	КВ-473	1623	0.812	I	115	360
КВ-427	676	0.338	I	400	145	КВ-475	1665	0.832	I		300
КВ-428	700	0.350	I	530	58	КВ-476	1685	0.842	I	118	310
КВ-429	723	0.361	I	310	220	КВ-477	1707	0.854	I	187	270
КВ-430	748	0.374	I	560	50	КВ-478	1727	0.863	I	100	330
КВ-432	791	0.396	I	440	52	КВ-479	1750	0.875	I	100	340
КВ-433	819	0.410	I	340	197	КВ-480	1773	0.887	I		330
КВ-434	839	0.419	I	330	240	КВ-482	1823	0.911	I	101	310
КВ-435	859	0.430	I	560	78	КВ-483	1843	0.922	I	81	360
КВ-436	879	0.440	I	300	230	КВ-484	1868	0.934	I	80	360
КВ-437	900	0.450	I	350	184	КВ-485	1898	0.949	I	230	480
КВ-440	960	0.480	I	170	230	КВ-486	1919	0.960	I	51	360
КВ-441	980	0.490	I	163	250	КВ-487	1943	0.971	I	72	350
Луккулайсварский интрузив											
552-284	95	0.020	I	1360	37	Лу-309	2603	0.560	III	200	360
552-139	190	0.041	I	1380	56	Лу-311	2720	0.585	III	153	270
550/89,0	395	0.085	I	1560	29	Лу-312	2783	0.598	III	175	250
Лу-601	910	0.196	II	210	270	Лу-313	2858	0.615	III	155	290
Лу-603	1035	0.223	II	185	250	Лу-314	2899	0.623	III	161	230
Лу-604	1080	0.232	II	132	250	Лу-315	2967	0.638	III	90	330
Лу-605	1240	0.267	II	193	210	Лу-316	3013	0.648	III	163	240

Таблица 1. Окончание

Проба	H, м	H _{отн}	*	Содержание, мкг/г		Проба	H, м	H _{отн}	*	Содержание, мкг/г	
				Ni	Sr					Ni	Sr
Лу-606	1325	0.285	II	270	270	Лу-317	3075	0.661	III	147	230
Лу-607/1	1414	0.304	II	370	11	Лу-318	3122	0.671	III	185	200
Лу-609	1499	0.322	II	200	220	Лу-319	3182	0.684	III	186	230
Лу-613	1805	0.388	II	158	250	Лу-321	3207	0.690	III	135	290
Лу-614	1915	0.412	II	380	270	Лу-322	3278	0.705	III	134	290
Лу 358	1992.1	0.428		240	300	Лу-323	3448	0.742	III	137	260
Лу-301	2000	0.430	III	800	230	Лу-324	3509	0.755	III	156	260
Лу 356	2002.1	0.431	III	960	95	Лу-325	3544	0.762	III	154	250
Лу-235	2045	0.440	III	320	164	Лу-326	3645	0.784	III	110	340
Лу-302	2182	0.469	III	220	300	Лу-10/1	3745	0.805	III	113	320
Лу-303/1	2280	0.490	III	166	270	Лу-10/2	3915	0.842	III	64	470
Лу-304	2307	0.496	III	107	320	Лу-10/4	3975	0.855	III	81	310
Лу-305/1	2364	0.508	III	320	250	Лу-237	4085	0.878	III	24	290
Лу-307	2490	0.535	III	160	270						
Ципрингский интрузив											
Ц84-2	30	0.010	I	220	220	ПЦ137	2240	0.723	II	146	350
Ц136	100	0.032	I	190	290	ПЦ202	2255	0.727	II	111	290
Ц138-1	380	0.123	I	151	350	ПЦ203	2278	0.735	II	124	310
Ц137-3	480	0.155	I	560	300	ПЦ204	2306	0.744	II	340	280
Ц134-3	620	0.200	I	550	390	ПЦ205	2330	0.752	II	240	250
Ц134-12	800	0.258	I		230	ПЦ206	2356	0.760	II	168	310
Ц44	950	0.307	I	640	220	ПЦ207	2390	0.771	II	176	240
Ц65,65/5	1030	0.332	I	240	420	ПЦ212	2407	0.777	II	200	250
Ц65-13	1035	0.334	I	320	350	ПЦ106	2415	0.779	II	220	180
Ц65-1	1050	0.339	I	179	440	ПЦ211	2433	0.785	II	89	330
Ц41	1640	0.529	I	163	420	ПЦ110	2460	0.794	II	111	310
Ц100	1690	0.545	I	310	240	ПЦ209	2484	0.801	II	166	380
Ц40-2	1710	0.552	II	138	220	ПЦ208	2510	0.810	II	130	330
Ц102	1750	0.565	II	210	230	ПЦ213	2532	0.817	II	220	350
Ц113-1	1900	0.613	II	168	270	ПЦ214	2561	0.826	II	165	370
Ц104	1930	0.623	II	142	230	ПЦ108-2	2770	0.894	II	124	440
ПЦ189	1980	0.639	II	176	280	ПЦ108-1	2840	0.916	II	93	400
ПЦ170	2060	0.665	II	88	290	ПЦ35	2890	0.932	II	25	380
Ц106	2180	0.703	II	85	280	ПЦ66	2960	0.955	II	119	330
ПЦ201	2235	0.721	II	124	290						

* Номер профиля опробования на соответствующем интрузиве (см. рис. 2).

нералы, а по кальцийсодержащим – кальцийсодержащие низкотемпературные минералы.

Таким образом, можно утверждать, что вторичные изменения пород обсуждаемых интрузивов имели изохимический характер. Следует заметить, что степень вторичных изменений минимальна в породах Киваккского массива и максимальна в породах интрузива Луккулайсваара.

РЕЗУЛЬТАТЫ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

Кластерный метод, являясь строгим количественным методом анализа многомерных множеств, тем не менее содержит два субъективных пункта. Первый из них связан с формированием выборки, которую нужно разбить на группы, а второй – с выбором шага объединения, на котором следует остановиться, т.е. с выбором количества кластеров и их состава.

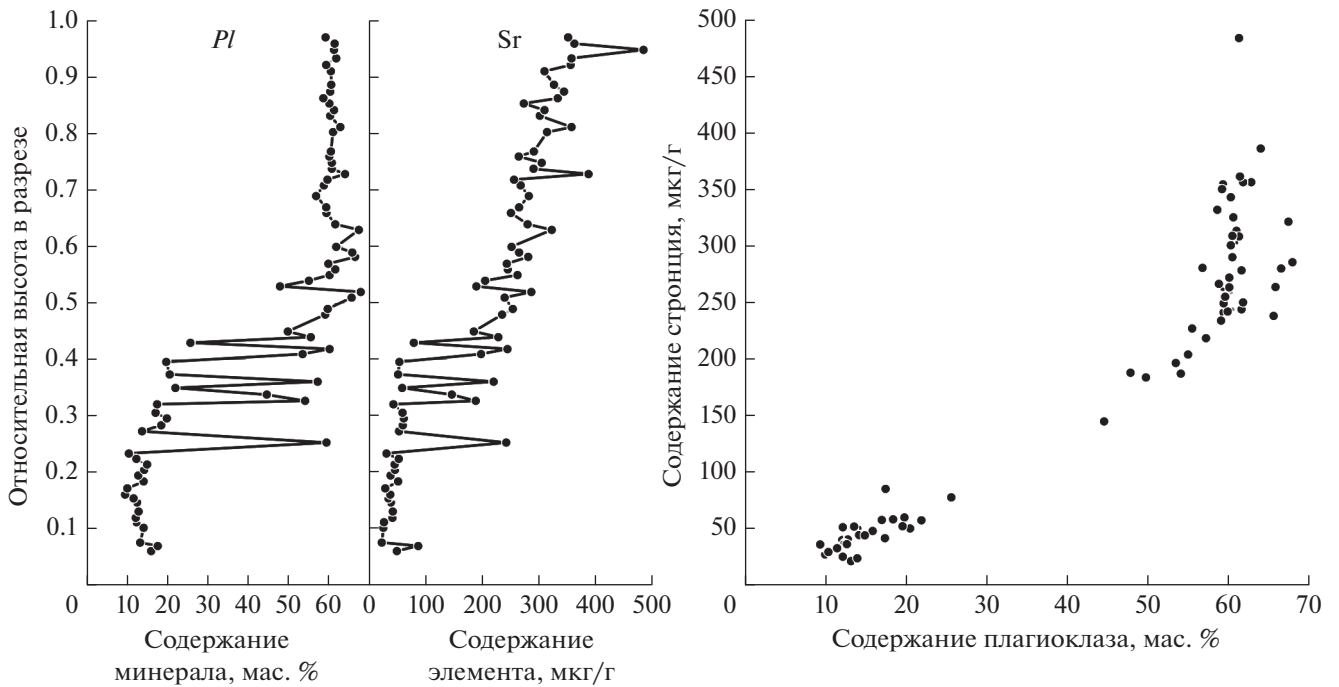


Рис. 4. Распределение содержаний плагиоклаза и стронция в вертикальном разрезе Киваккского интрузива и корреляция между ними.

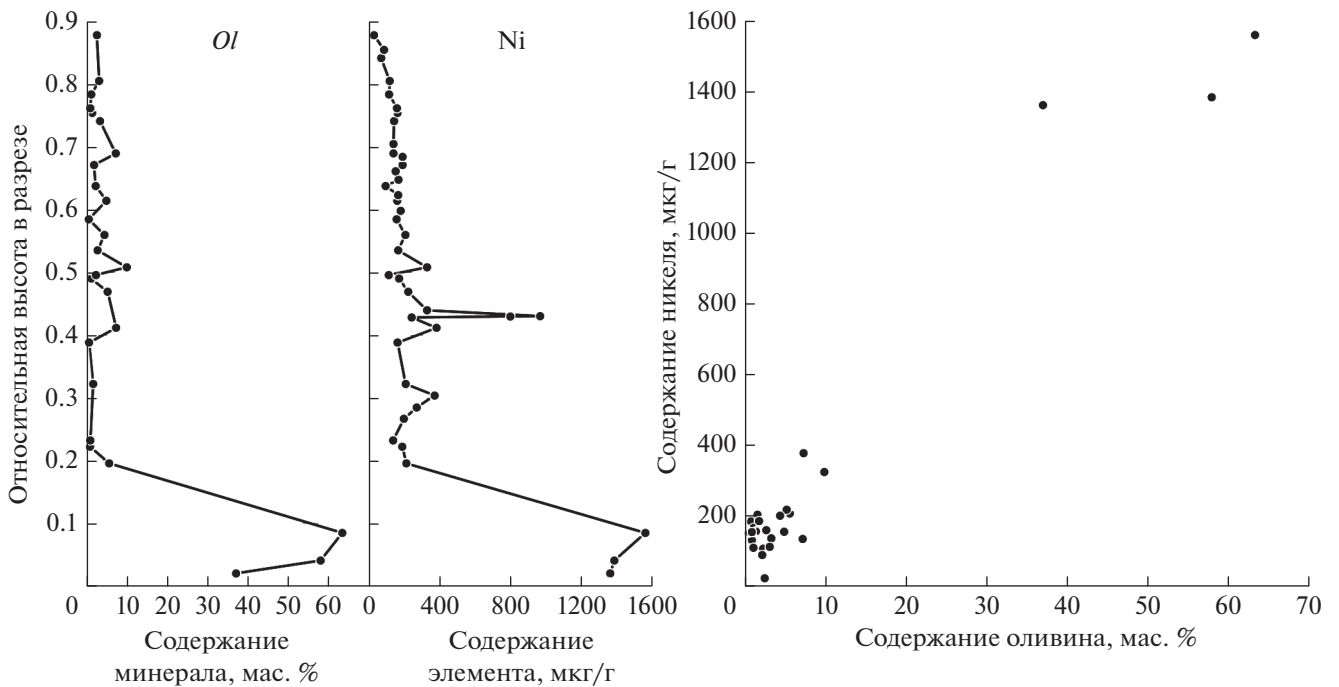


Рис. 5. Распределение содержаний оливина и никеля в вертикальном разрезе Луккулайсваарского интрузива и корреляция между ними.

Для кластерного анализа в выборку включены полученные в нашей исследовательской группе опубликованные ранее силикатные анализы горных пород массивов (Коптев–Дворников и др.,

2001; Семенов и др., 1995; Glebovitsky et al., 2001): всего 303 анализа: 124 из них – пробы массива Луккулайсваара, 92 – Ципринга и 87 – Кивакка. Разнообразие составов горных пород, слагающих

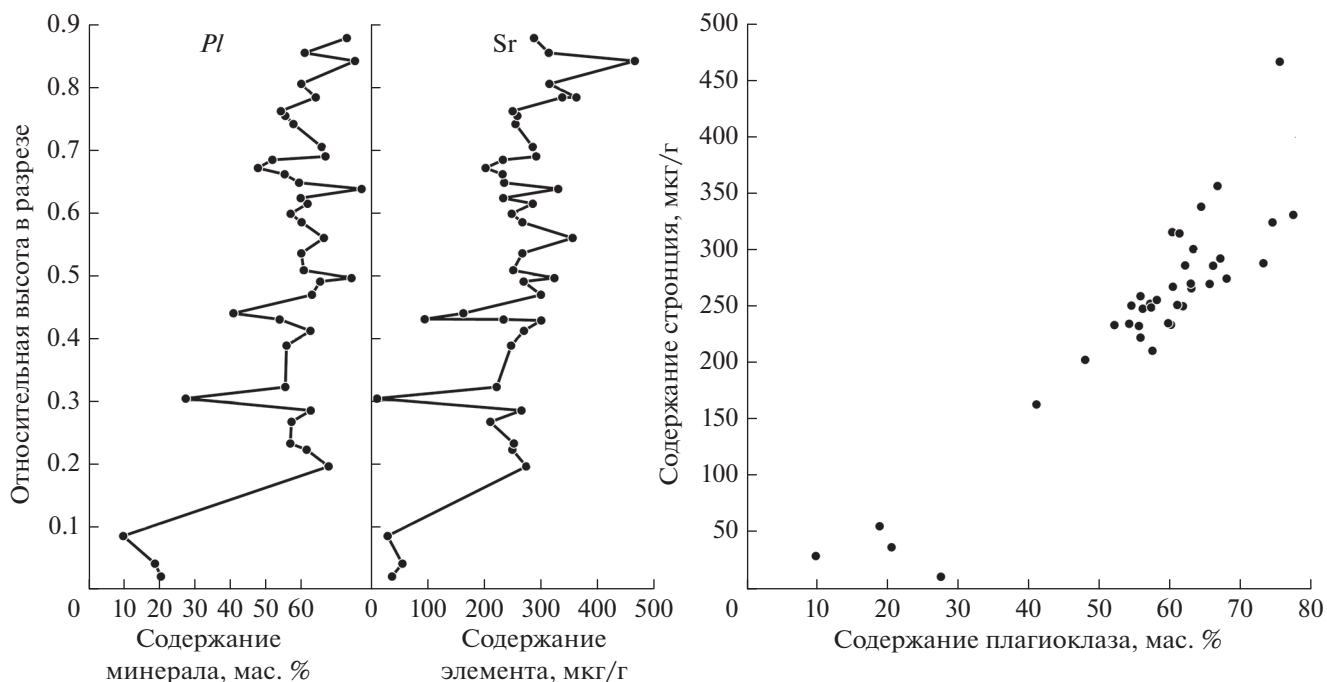


Рис. 6. Распределение содержаний плагиоклаза и стронция в вертикальном разрезе Луккулайсварского интрузива и корреляция между ними.

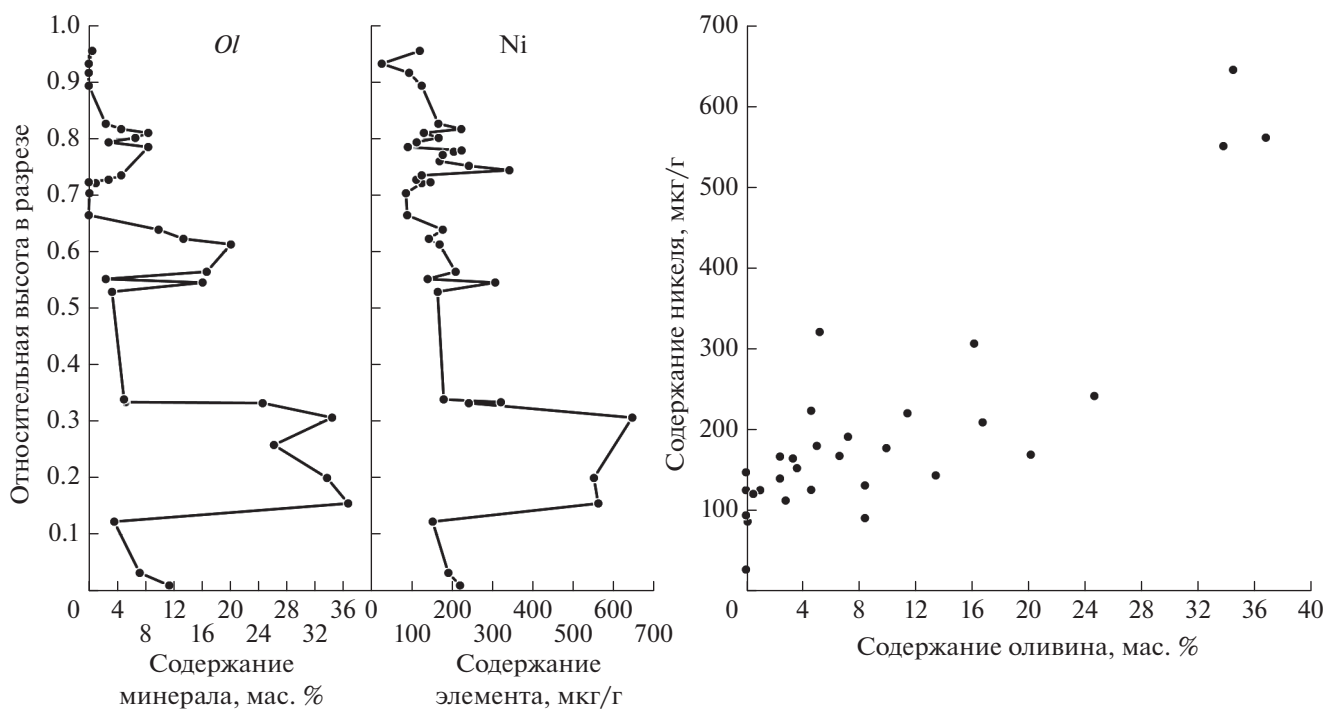


Рис. 7. Распределение содержаний оливина и никеля в вертикальном разрезе Ципрингского интрузива и корреляция между ними.

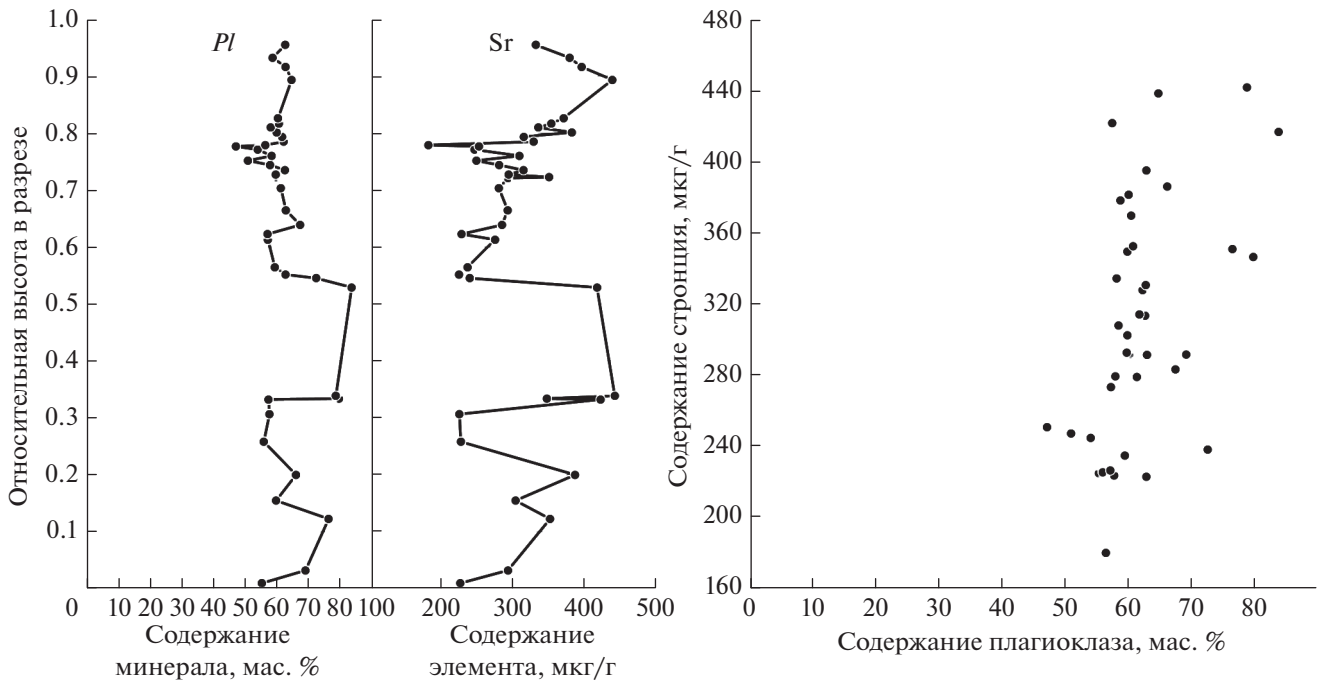


Рис. 8. Распределение содержаний плагиоклаза и стронция в вертикальном разрезе Ципрингского интрузива и корреляция между ними.

интрузивы, демонстрируют вариационные диаграммы на рис. 9.

Совместная обработка химических анализов пород трех массивов проводилась с целью выяснения сходства и различия наборов кумулатов в этих интрузивах и, поскольку все пробы привязаны к вертикальной координате в разрезах, то и с целью выявления сходства и различия распределения кумулатов в разрезах.

Что касается второго субъективного момента, то мы преследовали цель получить такую петрохимическую классификацию, которая приближалась бы к принятой нами петрографической (кумулятивной), имеющей генетический смысл. Сопоставление петрохимических типов и структурно-петрографических видов пород, выполненное нами ранее с методической целью для массивов с менее измененными вторичными процессами породами (Киваккский, Йоко-Довыренский, Бураковский и др.), показало, что если нормативное содержание пироксена в породе с кумулятивной структурой превышает 10 об. %, а плагиоклаза – 25 об. %, то эти минералы имеют, как правило, кумулятивную природу, если меньше – то интеркумулятивную. Результаты кластерного анализа отдельных выборок силикатных анализов пород Киваккского и Ципрингского интрузивов показали, что они четко подразделяются на кластеры (петрохимические типы), отвечающие этим эмпирическим критериям, т.е. эти кластеры могут быть интерпретированы как соответствующие кумулаты.

Сопоставление петрохимических типов со структурно-петрографическими видами пород Киваккского и Ципрингского интрузивов показывает их хорошее соответствие (в табл. 2, 3 – сопоставление проведено только по породам, не измененным вторичными процессами).

Справедливость допущений, принятых для вышеупомянутой кумулятивной интерпретации нормативных содержаний минералов для Луккулайсваарского интрузива не может быть предварительно оценена из-за сильных вторичных изменений. Тем не менее, поскольку эти критерии оказались справедливы для существенно различающихся по составу материнских магм и набором кумулатов Киваккского, Ципрингского, Бураковского и Йоко-Довыренского массивов, можно с достаточной уверенностью распространить их (критерии) и на породы Луккулайсваарского интрузива, тем более что состав его исходной магмы относится к тому же марианит-бонинитовому типу, что и магма Киваккского массива.

В соответствии с ранее упомянутыми критериями выделения кумулятивных минералов, полученные кластеры объединены в 12 петрохимических групп и подгрупп по признаку одинакового набора кумулятивных минералов в каждой группе (табл. 4).

Группы названы по кумулятивному парагенезису:

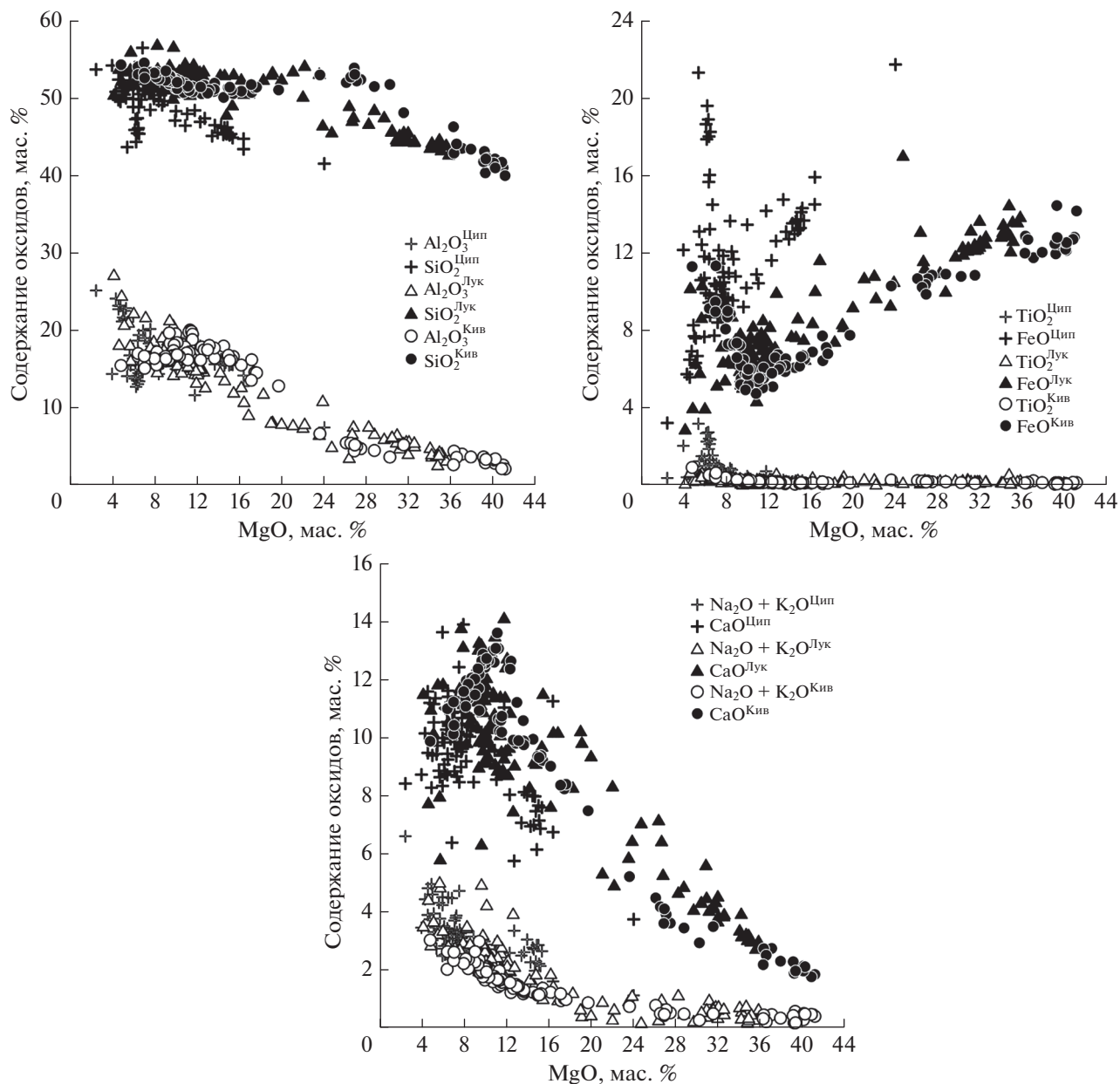


Рис. 9. Вариационные диаграммы составов изверженных пород, слагающих Киваккский, Луккулайсваарский и Ципрингский интрузивы.

1. **Оливиниты.** Группа представлена исключительно оливиновыми кумулатами Киваккского массива.

2. **Бронзититы.** В группу бронзитовых кумулатов входят образцы двух массивов: Кивакка и Луккулайсваара.

3. **Гарцбургиты.** Оливин-бронзитовые кумулаты присутствуют в массивах Кивакка и Луккулайсваара.

4. **Нориты.** Плаггиоклаз-бронзитовый кумулат присутствуют в массивах Кивакка и Луккулайсваара.

5. **Троктолиты.** Группа оливин-плаггиоклазовых кумулатов четко подразделяется на две подгруппы: мезо- и лейкотроктолитов. Этот кумулятивный парагенезис наблюдается только в Ципрингском массиве.

6. **Габбронориты.** В эту группу объединены плаггиоклаз-пироксеновые кумулаты. Она подразделяется на четыре подгруппы, из которых породы подгруппы собственно габброноритов принадлежат Киваккскому и Луккулайсваарскому интрузивам. Остальные три подгруппы, различающиеся содержанием кумулятивного магнетита,

Таблица 2. Сопоставление петрохимических типов и структурно-петрографических видов пород в Кивакском интрузиве

Структурно-петрографические виды	Петрохимические типы							
	Кл.1	Кл.2	Кл.3	Кл.4	Кл.5	Кл.6	Кл.7	Кл.8
Оливиниты	9	2						
Гарцбургиты		5	2					
Бронзититы				9				
Нориты					22			
Габбронориты					1	21		2
Габбронориты пижонитовые							11	3

Таблица 3. Сопоставление петрохимических типов и структурно-петрографических видов пород в Ципрингском интрузиве (по породам, не измененным вторичными процессами)

Структурно-петрографические виды	Петрохимические типы						
	Кл.1	Кл.2	Кл.3	Кл.4	Кл.5	Кл.6	Кл.7
Меланотроктолиты	1						
Мезотроктолиты		9	1				
Лейкотроктолиты		1	7	1			
Оливиновые габбро				3			
Габбронориты					7		
Магнетит, содержащий габбронориты						2	
Магнетитовые габбронориты							2

в которых ортопироксен представлен претерпевшим инверсию пижонитом, объединяют породы массива Ципринга.

7. Оливиновые габбро. Группа представлена трехминеральным плагиоклаз-клинопироксен-оливиновым кумулатом. Оливиновое габбро присутствует только в массиве Ципринга.

8. Пижонитовые кварцсодержащие габбронориты не образуют общего кластера. Признаком для их выделения послужили присутствие нормативного кварца (до 6%) и самые высокие для каждого массива содержания некогерентного фосфора (Коптев–Дворников и др., 2001; Семенов и др., 1995; Glebovitsky et al., 2001). По положению в разрезе они отвечают сэндвичевым горизонтам, являясь низкотемпературными дифференциатами.

Данные в табл. 4 убедительно демонстрируют, что в результате формализованной классификации химических составов горных пород трех плутонов методом кластерного анализа породы массивов Луккулайсваара и Кивакка объединяются в общие петрохимические группы, в то время как породы Ципрингского интрузива образуют группы с отличающимися кумулятивными парагенезисами.

СРАВНЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ МАССИВОВ И ТИПОВ РИТМИЧНОСТИ В НИХ

Образцы, использованные для кластерного анализа, охватывают полный вертикальный разрез каждого из массивов. Пробы имеют привязку к вертикальной координате в разрезе, что позволяет выявить положение в разрезах массивов выделенных в результате кластерного анализа петрохимических групп и распределение установленных по формальным критериям кумулятивных парагенезисов. Поскольку массивы имеют разную мощность вертикального разреза, удобнее сопоставлять не абсолютные, а относительные высоты (абсолютная высота пробы в разрезе, отнесенная к мощности массива) (рис. 10).

Нетрудно видеть совпадение с ранее предложенными стратиграфическими характеристиками метровой расслоенности и ее положением в разрезе для Кивакского и Ципрингского массивов (Коптев–Дворников и др., 2001; Семенов и др., 1995; Glebovitsky и др., 2001). Здесь неожиданностей не появилось.

В Луккулайсваарском массиве все выглядит иначе. Ранее в строении габброидной части разреза Луккулайсваарского интрузива выделяли две повторяющиеся последовательности зон норитов

Таблица 4. Петрохимические группы и подгруппы

Количество проб	Pl	Cpx	Opx	Ol	Название группы	Распределение кластеров по интрузивам		
						Кивакка	Луккулайсваара	Ципринга
12	11	3	2	84	Оливиниты			
12	20.9	7	60	12	Бронзититы			
40	17–24	6–10	15–27	40–60	Гарцбургиты			
74	48–72	7–12	16–36	0–4	Нориты			
18	30–60	2–3	0–3	37–64	Троктолиты			
19	71–83	4–6	0–2	11–23	Лейкотроктолиты			
68	31–62	16–32	19–40	0–6	Габбронориты			
17	59–61	15–18	22–23*	0	Пижонитовые габбронориты			
14	61–67	12–16	17–19*	0	Магнетитсодержащие пижонитовые габбронориты**			
9	57	18	15*	0	Магнетит-пижонитовые габбронориты***			
14	54–69	20.5	4–9	8–17	Оливиновые габбро			
1	61	16	18	0	Пижонитовые кварцсодержащие габбронориты, обогащенные некогерентными элементами			
3	72	10	16	0				
2	60	11	21	0				

Примечание. Жирным шрифтом выделены кумулятивные фазы.

*Ортопироксен представлен инвертированным пижонитом; **содержат около 4% кумулятивного магнетита; ***содержат около 10% кумулятивного магнетита.

I, габброноритов I и норитов II, габброноритов II (Glebovitsky и др., 2001). В результате формализованной классификации горных пород Луккулайсваарского массива методом кластерного анализа выяснилось, что вместо двукратной смены в разрезе норитов габброноритами проявилось сквозное крупномасштабное (порядка 100–200 м) переслаивание норитов и габброноритов, захватывающее всю габброидную толщу расслоенной серии. При этом в двучленных ритмах снизу вверх растет относительная мощность габброноритов и уменьшается норитов.

Таким образом, построение опорных разрезов для всех интрузивов, основанное на результатах кластерного анализа, показывает, что несмотря на близкий возраст и единую тектоническую обстановку, вертикальные разрезы массивов значительно отличаются.

ОБСУЖДЕНИЕ

Совместный анализ пространственной и внепространственной структур трех интрузивов выявил, что набор кумулятивных парагенезисов и их последовательность в разрезах свидетельствуют о

разном порядке кристаллизации материнских магм. Средневзвешенный состав пород Киваккского массива характеризуется высоким содержанием магния, относительно высоким содержанием кремнезема и низким содержанием оксида титана (Коптев–Дворников и др., 2001). По этим признакам состав отвечает магмам марианит-бонинитового ряда (Богатиков и др., 1987). Средневзвешенный состав Луккулайсваарского интрузива также относится к магмам марианит-бонинитового ряда, но с меньшим содержанием магния и более высоким содержанием кремнезема, чем средневзвешенный состав Киваккского массива (Glebovitsky и др., 2001). Средневзвешенный состав Ципрингского интрузива и набор его кумулятивных парагенезисов характерны для магм толеитового типа с повышенными содержаниями железа и глинозема (Семенов и др., 1995). Средневзвешенные составы трех массивов приведены в табл. 5.

Эти составы были использованы в качестве исходных для внедрившихся магм при моделировании динамики формирования Киваккского и Ципрингского интрузивов с помощью программы

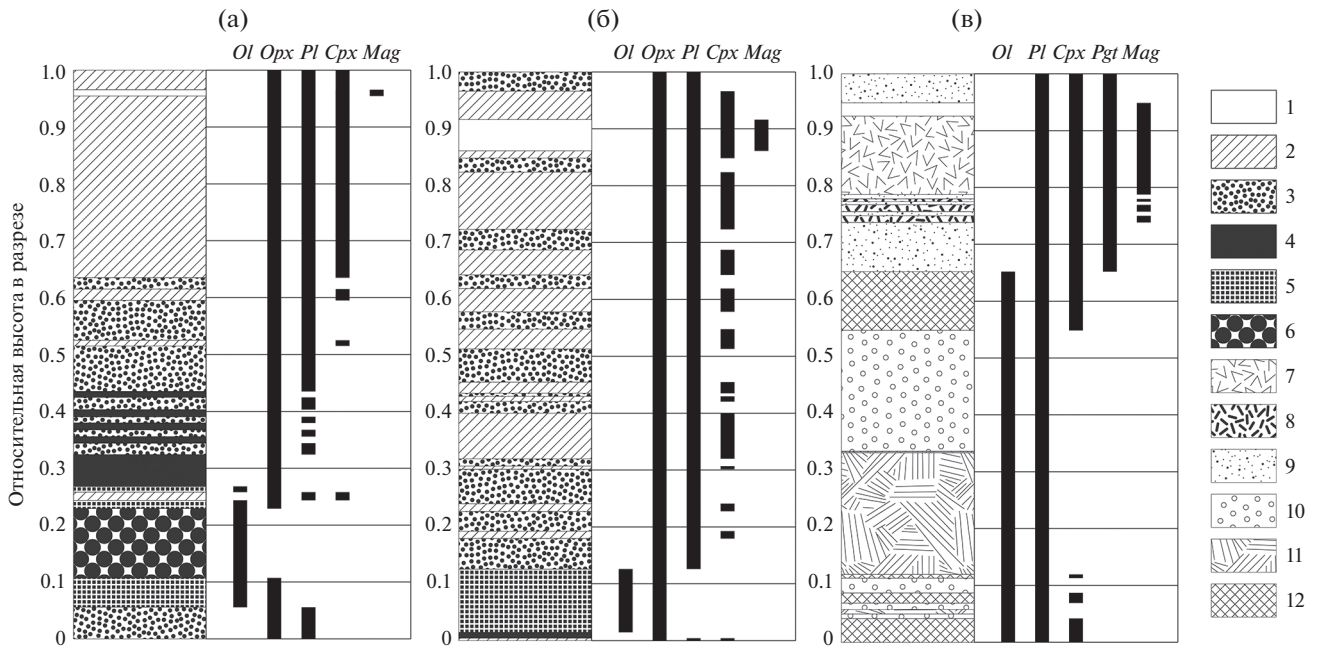


Рис. 10. Опорные разрезы Киваккского (а), Луккулайсваарского (б) и Ципрингского (в) интрузивов. Распределение петрохимических групп и кумулятивных минералов в вертикальном разрезе массивов. 1 – сэндвичевый горизонт; 2 – габбронориты; 3 – нориты; 4 – бронзититы; 5 – гарцбургиты; 6 – оливиниты; 7 – магнетитсодержащие пижонитовые габбронориты; 8 – магнетит-пижонитовые габбронориты; 9 – пижонитовые габбронориты; 10 – лейкократовые троктолиты; 11 – троктолиты; 12 – оливиновые габбро.

КОМАГМАТ версии 3.5 (Арискин, Бармина, 2000; Френкель и др., 1988; Френкель, 1995). Результаты численного моделирования динамики

формирования Киваккского интрузива (Коптев–Дворников и др., 2011, 2012; Vuchkova и др., 2019) демонстрируют, что кристаллизация средневзвешенного состава, принятого в качестве родительской магмы, происходит в том же порядке, в котором сменяются кумулятивные парагенезисы в вертикальном разрезе массивов и при этом удается количественно воспроизвести распределение главных и примесных химических элементов в разрезе. Можно сделать обоснованный вывод, что Киваккский и Ципрингский интрузивы сформировались в результате одноактных внедрений магм и дифференциации *in situ*.

Таблица 5. Средневзвешенные составы интрузивов

Компоненты	Киваккский	Луккулайсваарский	Ципрингский
SiO ₂	49.84	51.74	49.82
TiO ₂	0.23	0.27	0.58
Al ₂ O ₃	12.54	15.29	17.92
FeO	8.96	7.79	10.37
MnO	0.16	0.16	0.15
MgO	18.11	12.75	8.17
CaO	8.4	9.67	9.73
Na ₂ O	1.51	1.98	2.73
K ₂ O	0.23	0.31	0.46
P ₂ O ₅	0.02	0.03	0.06

Выявленные ранее и установленные в настоящей статье характеристики строения массива Луккулайсваара делали бесперспективным моделирование его формирования с помощью программы КОМАГМАТ, поскольку в КОМАГМАТ^е используется весьма упрощенный способ моделирования внутрикамерной конвекции.

Различающиеся по исходному составу магм и порядку кристаллизации Киваккский и Ципрингский интрузивы имеют схожие характеристики ритмической расслоенности: метровая мощность ритмов и приуроченность к участкам изменения кумулятивных парагенезисов. Однако в Киваккском массиве ритмическое переслаивание брон-

зититов и норитов происходит в нижней половине разреза, т.е. отвечает относительно раннему этапу формирования массива, тогда как в Ципрингском интрузиве чередование магнетит-пижонитовых габброноритов и пижонитовых габброноритов наблюдается в верхних частях разреза, т.е. на относительно поздних стадиях кристаллизации.

В то же время относящиеся к близкому типу исходных магм и одинаковому набору кумулятов интрузивы Кивакка и Луккулайсваара имеют явно различный характер ритмичности.

Наличие вставленных в расслоенную серию Луккулайсваарского массива тел микрогаббро и другой стиль ритмичности могут свидетельствовать о дополнительных внедрениях, а могут и отражать другой сценарий внутрикамерной конвекции магм. Одним из путей решения этой дилеммы является формализация высказанной ранее струйно-супензионной гипотезы (Бычкова, Коптев–Дворников, 2004) и превращение ее в численную системную модель, что позволит количественно рассмотреть различные варианты возникновения инверсии плотности в магматической камере, что, в свою очередь, может привести к различающемуся характеру конвективных течений.

ВЫВОДЫ

1. Олангская группа – компактный исследовательский полигон для проверки петрогенетических концепций. Несмотря на возрастную и пространственную близость три интрузива имели разный состав исходных магм, различные наборы кумулятивных парагенезисов, различное внутреннее строение и характер ритмической расслоенности.

2. С помощью кластерного анализа содержаний главных элементов восстановлены кумулятивные парагенезисы в изохимически измененных горных породах Ципрингского и Луккулайсваарского интрузивов.

3. Анализ пространственной и внепространственной структур массивов показал, что набор кумулятивных парагенезисов и их последовательность в разрезах интрузивов подтверждают отнесение интрузивов Кивакка и Луккулайсваара к производным магм, отвечающих по составу бонинит-марианитовому ряду, а материнской магмы массива Ципринга – к толеитам с повышенными содержаниями железа и глинозема.

4. В строении разрезов массивов Кивакка и Ципринга, несмотря на разный состав исходных магм и разный порядок кристаллизации имеют место четкое разделение на зоны по кумулятив-

ным парагенезисам, на границах зон наблюдается ограниченное развитое ритмическое переслаивание (с мощностью ритмов от первых метров до первых десятков метров). В противоположность этому в Луккулайсваарском интрузиве нет четкого выделения кумулятивных зон, и по всей мощности массива установлено крупномасштабное ритмическое переслаивание (мощности ритмов от первых десятков до первых сотен метров).

Благодарности. Мы посвящаем эту публикацию памяти семьи Куликовых, известных исследователей магматических объектов Балтийского щита. Виктория Владимировна и Вячеслав Степанович Куликовы и их дочь Яна Вячеславовна Бычкова (в девичестве Куликова) представляют семью, члены которой объединены не только родственными связями, но и общей интеллектуальной деятельностью (см., например (Куликов и др., 2008) и многие другие). Я.В. Бычкова состоялась как исследователь процессов магматической эволюции и, в частности, проблемы генезиса контрастной ритмической расслоенности в мафит-ультрамафитовых массивах на материале дифференцированных интрузивов Олангской группы. В своих изысканиях она успешно сочетала унаследованные от родителей приемы полевых исследований изверженных горных пород в условиях Крайнего Севера с глубоким анализом полученных ею геохимических и петрографических материалов, включая методы численного моделирования (Бычкова, 2003, Vuchkova и др., 2019), что позволило ей убедительно обосновать многослойно-супензионную гипотезу образования ритмической расслоенности киваккского типа.

Мы искренне благодарим Редколлегию и рецензентов журнала “Петрология” за рассмотрение рукописи статьи и полезные замечания, послужившие улучшению качества публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Амелин Ю.В., Семенов В.С. О возрасте и источнике магм нижнепротерозойских расслоенных интрузий Карелии // Тез. докл. “Изотопное датирование эндогенных рудных формаций”. Тбилиси. 1990. С. 40–42.
- Арискин А.А., Бармина Г.С. Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. М.: МАИК “Наука/Интерпериодика”, 2000.
- Барков А.Ю., Ганнибал Л.Ф., Рюнгген Г.И., Балашов Ю.А. Датирование цирконов из расслоенного массива Кивакка, Северная Карелия // Методы изотопной геологии. Тез. докл. Всесоюзной школы-семинара. Звенигород. 1991. С. 21–23.
- Богатиков О.А., Косарева Л.В., Шарков Е.В. Средние химические составы магматических горных пород. Справочник. М.: Недра, 1987. 152 с.

- Богачев А.И., Куликов В.С., Пекуров А.В., Слюсарев В.Д.* Новые данные по геологии и магматизму синклинирной зоны Ветреного Пояса // Вулканогенные и гипербазитовые комплексы протерозоя Карелии. Тр. Ин-та геологии. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1968. С. 5–25.
- Бычкова Я.В.* Закономерности строения контрастной ритмической расслоенности в Кивакском интрузиве. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 2003.
- Бычкова Я.В., Коптев–Дворников Е.В.* Ритмическая расслоенность Кивакского типа: геология, петрография, гипотеза формирования // Петрология. 2004. Т. 12. № 3. С. 281–302.
- Бычкова Я.В., Коптев–Дворников Е.В., Кононкова Н.Н., Каменева Е.Е.* Составы породобразующих минералов Кивакского расслоенного массива (Северная Карелия) и закономерности вариаций состава минералов подзоны ритмического переслаивания // Геохимия. 2007. № 2. С. 159–179.
- Бычкова Я.В., Бычков А.Ю., Бычков Д.А.* Методы геохимических исследований. Часть 2. Многоэлементный анализ примесей в геологических пробах методом ИСП-МС (подготовка к измерению и обработка данных). М.: Книга-Мемуар, 2019. 88 с.
- Клюнин С.Ф., Гроховская Т.Л., Захаров А.А., Соловьева Т.В.* Геология и перспективы платиноносности Олангской группы массивов (Северная Карелия) // Геология и генезис месторождений платиновых металлов. М.: Наука, 1994. С. 111–125.
- Коптев–Дворников Е.В., Киреев Б.С., Пчелинцева Н.Ф., Хворов Д.М.* Распределение кумулятивных парагенезисов, породобразующих и второстепенных элементов в вертикальном разрезе Кивакского интрузива (Олангская группа интрузивов, Северная Карелия) // Петрология. 2001. Т. 9. № 1. С. 3–27.
- Коптев–Дворников Е.В., Ярошевский А.А., Вейс В.А.* Направленная кристаллизация не является механизмом магматической эволюции // Вестн. ОНЗ РАН. 2011. Т. 3. № 6040.
- Коптев–Дворников Е.В., Арьяева Н.С., Бычков Д.А.* Уравнение термобарометра для описания сульфид-силикатной ликвации в базитовых системах // Петрология. 2012. Т. 20. № 5. С. 1–18.
- Куликов В.С., Бычкова Я.В., Куликова В.В., Костицын Ю.А.* Интрузив Руйга как типовой представитель малоуглубинной фации палеопротерозойской перидотит-габбро-коматит-базальтовой ассоциации Ветреного Пояса, Юго-Восточная Фенноскандия // Петрология. 2008. Т. 16. № 6. С. 571–592.
- Лавров М.М.* Гипербазиты и расслоенные перидотит-габбро-норитовые интрузии докембрия Северной Карелии. Л.: Наука, 1979.
- Семенов С.В.* Генетические типы Fe-Ni-Cu-сульфидного и платинотетраметалльного оруденения в расслоенном базит-ультрабазитовом интрузиве Луккулайсваара (Северная Карелия). Дис. ... канд. геол.-мин. наук. СПб.: ИГГД РАН, 2012.
- Семенов В.С., Коптев–Дворников Е.В., Берковский А.Н. и др.* Расслоенный троктолит-габбро-норитовый интрузив Ципринга, Северная Карелия: геологическое строение, петрология // Петрология. 1995. Т. 3. № 6. С. 1–23.
- Семенов В.С., Беляцкий Б.В., Кольцов А.Б. и др.* Метасоматиты расслоенного комплекса Луккулайсваара и связанная с ним платинотетраметалльная минерализация (Олангская группа интрузий, Северная Карелия) // Петрология. 1997. Т. 5. № 2. С. 137–159.
- Трубицын В.П., Харьбин Е.В.* Обобщенная неустойчивость Рэлея-Тейлора для суспензий, седиментационная конвекция // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2012. Т. 13. № 1. С. 1–19.
- Френкель М.Я., Ярошевский А.А., Арискин А.А. и др.* Динамика внутрикамерной дифференциации базитовых магм. М.: Наука, 1988. 213 с.
- Френкель М.Я.* Тепловая и химическая динамика дифференциации базитовых магм. М.: Наука, 1995. 239 с.
- Шмыгалев В.И.* Интрузии основных и ультраосновных пород Олангской группы // Вулканогенные и гипербазитовые комплексы протерозоя Карелии. Тр. Ин-та геологии. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1968. С. 209–219.
- Ярошевский А.А.* О происхождении ритмических структур изверженных горных пород // Геохимия. 1970. № 5. С. 562–574.
- Alapieti T.* The Koillismaa layered igneous complex, Finland-Its structure, mineralogy, and geochemistry, with emphasis on the distribution of chromium // Geol. Sur. Finland Bull. 1982. V. 319.
- Amelin Y.V., Semenov V.S.* Nd and Sr isotope geochemistry of the mafic layered intrusions of the Baltic Shield: Constraints on the origin of early Proterozoic and “boninitic” magmas // Contrib. Mineral. Petrol. 1996. V. 124. P. 255–272.
- Amelin Y.V., Heaman L.M., Semenov V.S.* U-Pb geochronology of layered mafic intrusions in the eastern Baltic Shield: Implications for the timing and duration of Paleoproterozoic continental rifting // Precamb. Res. 1995. V. 75. № 1–2. P. 31–46.
- Bychkova Y.V., Mikliaeva E.P., Koptev–Dvornikov E.V. et al.* Proterozoic Kivakka layered mafic-ultramafic intrusion, Northern Karelia, Russia: Implications for the origin of granulites of the upper boundary group // Precamb. Res. 2019. V. 331. P. 105381.
- Glebovitsky V.A., Semenov V.S., Belyatsky B.V., Koptev–Dvornikov E.V.* The structure of the Lukkulaisvaara intrusion, Oulanka group, northern Karelia: Petrological implications // Canada Mineral. 2001. V. 39. № 2. P. 607–637.
- Namur O., Bénédicte Abily, Boudreau A.E. et al.* Igneous layering in basaltic magma chambers // Layered Int. 2015. <https://doi.org/10.1007/9789401796521>
- Turchenko S.I., Semenov V.S., Amelin Ju.V., Levchenkov O.A.* The early Proterozoic riftogenic belt of northern Karelia and associated Cu-Ni, PGE and Cu-Au mineralizations // Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar. 1991. V. 113. № 1. P. 70–72.
- Wager L.R., Deer W.A.* Geological investigations in East Greenland, Pt. III. The petrology of the Skaergaard Intrusion, Kangerdlugssuaq, East Greenland // Medd. Grøn. 1939. V. 105. P. 1–352.
- Ward Jr J. H.* Hierarchical grouping to optimize an objective function // J. Amer. Statist. Assoc. 1963. V. 58. № 301. P. 236–244.

Comparative characteristics of the layering of mafic-ultramafic intrusions of the Oulanka Group, North Karelia

A. R. Tskhovrebova¹, E. V. Koptev–Dvornikov², and D. A. Bychkov²

¹ Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, Russia

The Oulanka Group is a compact research area for testing petrogenetic concepts. Despite the age and spatial similarity, the three intrusions have a different composition of the original magmas, different sets of cumulative parageneses, different internal structures, and rhythmic layering. With the help of cluster analysis of the contents of the main elements, cumulative parageneses in isochemically altered rocks of the Tsipringa and Lukkulaivaara massifs were reconstructed. In the structure of the sections of the Kivakka and Tsipringa massifs, despite the different composition of the initial magmas and the different order of crystallization, there is a clear division into zones according to cumulative parageneses; at the boundaries of the zones, there is a limited development of rhythmic interbedding (with rhythm thickness from a few meters to a few tens of meters). In contrast, there is no clear distinction of cumulative zones in the Lukkulaivaara intrusive, and large-scale rhythmic interbedding has been established throughout the entire thickness of the massif (rhythm thicknesses from a few tens to a few hundreds of meters). Possibly, the different character of rhythm in the three intrusions reflects different scenarios of intrachamber convection of magmas.

Keywords: mafic-ultramafic intrusions, cluster analysis, rhythmic layering, distribution of Sr, Ni