

СОСТАВ, СТРОЕНИЕ И ФЛЮИДНЫЙ РЕЖИМ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ ПОРФИРИТОВОЙ ИНТРУЗИИ МАГНИТОГОРСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2016 г. Т. Д. Бочарникова, В. В. Холоднов, Е. С. Шагалов, Е. В. Коновалова

*Институт геологии и геохимии УрО РАН,
620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15
E-mail: Bocharnikova@igg.uran.ru*

Поступила в редакцию 14.07.2015 г.

Принята к печати 21.09.2015 г.

На примере дифференцированной субвулканической порфиритовой интрузии, подстилающей Магнитогорское скарново-магнетитовое месторождение, выявлены закономерные связи петрогеохимических особенностей пород с составом галогенов (Cl, F) в аксессуарном апатите. В процессе становления порфиритовой интрузии на фоне общего тренда дифференциации от пироксеновых порфиритов основания интрузии до атачитов (трахиандезитов, фонотефритов) в верхней ее части образовалось несколько автономных флюидно-магматических систем (ФМС), отличающихся по распределению как петрогенных элементов, так и многих элементов-примесей, а также по составу галогенов в апатитах. В самой верхней атачитовой части разреза, наиболее насыщенной щелочами и летучими компонентами, в результате флюидно-магматического расслоения были образованы, с одной стороны, натриевые атачиты, обогащенные Na, Ca, Sr с повышенным содержанием Cl в апатите, а с другой, – калиевые “рудные” атачиты, расположенные на более высоком гипсометрическом уровне и обогащенные K, Rb, Fe, V, Ti, P при повышенном содержании F в апатите. Формирование субвулканической интрузии сопровождалось неоднократным проявлением эксплозивных явлений. Перечисленные данные характеризуют особенности магматизма в Магнитогорской мегазоне в период D₃–C₁, на рубеже смены островодужного этапа развития на аккреционно-коллизийный (островная дуга-континент).

Ключевые слова: Магнитогорское скарново-магнетитовое месторождение, геохимия, петрология, флюиды, галогены, дифференциация, рудообразование, минералы, апатит.

ВВЕДЕНИЕ

На Южном Урале, на рубеже D₃–C₁ происходит приращение девонской Магнитогорской палеодуги к окраине Восточно-Европейской платформы (ВЕП). В этот период завершилось формирование девонской островной дуги [27, 36 и др.] и данная область в позднем девоне вступила в начальную фазу континентального развития, отмеченную сменой обстановок осадконакопления островодужной стадии D₂₋₃ субконтинентальными условиями седиментации в раннем карбоне [14, 19 и др.]. Этот процесс сопровождается субсинхронным образованием различных по составу и металлогении, гетерогенных магматических комплексов.

Целью данной статьи является выяснение особенностей магматизма постостроводужного этапа развития Магнитогорской мегазоны на рубеже D₃–C₁, субвулканические производные которого входят в состав самых ранних рудовмещающих толщ железорудных (скарново-магнетитовых) месторождений Магнитогорского рудного поля. На

месторождении Малый Куйбас близкие по составу породы входят в состав его рудовмещающей толщи. Магматические комплексы, формировавшиеся в этот период времени, могут иметь свою специфику, обусловленную переходной стадией развития. Эта специфика должна была отразиться и на субвулканических образованиях.

Одним из таких объектов является дифференцированная субвулканическая порфиритовая интрузия, слагающая основание вулканогенного разреза на Магнитогорском скарново-магнетитовом месторождении. В данном случае мы через призму эволюции флюидного режима и петрогеохимических особенности этой крупной дифференцированной субвулканической интрузии попытались определить индикаторы смены условий магмообразования и источников вещества на этапе инверсии охарактеризованных геодинамических обстановок.

Необходимо отметить, что проблема изучения флюидного режима процессов магматизма и рудообразования является одной из весьма актуальных и пер-

спективных направлений современных исследований [6, 32 и др.]. Летучие (галогены и другие) играют ведущую роль в процессах петро- и рудогенеза с формированием различных генетических типов рудных месторождений. Они выступают в качестве активных экстрагентов и транспортеров петрогенных и рудных элементов. В магматических расплавах и флюидах летучие имеют многокомпонентный состав и переменную концентрацию, что в сочетании с различными термодинамическими условиями, составами магм и химическими свойствами самих летучих компонентов обуславливает их избирательную активность в ходе магматического процесса и рудообразования. Участием различных летучих (Cl, F, S, CO₂ и др.) объясняется и интенсивность перераспределения химических элементов в дифференцированных и расслоенных интрузиях с появлением в них пород, с одной стороны, максимально обогащенных, а с другой, – обедненных рудными и другими компонентами [26]. Изучение процессов флюидно-магматического расслоения в рудно-магматических системах, характеризующихся различной водонасыщенностью, позволяет выявить источник флюидов, проследить пути их миграции и концентрации в таких системах.

Ранее на примере дифференцированной порфириновой интрузии Магнитогорского месторождения нами уже проводилось изучение процессов флюидно-магматического расслоения с участием галогенов Cl и F [4]. Было установлено, что эта интрузия имеет первичную хлоридную специализацию с явлениями дифференциации галогенов по вертикали (по типу расслоенных интрузий), с преимущественной концентрацией Cl в нижней, более основной по составу части интрузии, а F – в верхней, более щелочной (атачитовой). С этой порфириновой интрузией связывается мушкетовит-гематитовое оруденение, локализованное на контакте атачитов с известняками [2]. Мушкетовит-гематитовая руда здесь характеризуется почти полным отсутствием хлора (сотые доли процента) в составе апатита.

В данной работе нами продолжено изучение флюидного режима становления дифференцированной порфириновой интрузии, а также взаимосвязей петро-геохимических особенностей пород с составом галогенов в акцессорном апатите.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ

Известно, что в строении Магнитогорского месторождения, кроме пород габбро-гранитной интрузии, детально охарактеризованной [35 и др.], принимают участие более ранние порфириты, слагающие субинтрузивную дифференцированную залежь, подстилающую месторождение. В разрезе снизу вверх породы здесь представлены пироксен-порфириновыми базальтами, пироксен-плагиоклаз-

порфириновыми умеренно щелочными и щелочными базальтоидами, а также завершающими разрез атачитами. Последние представляют собой богатые щелочами специфические породы, в целом, отвечающие по составу трахиандезиту, фонотефриту. В самом верху разреза атачиты имеют обломочное строение, ниже по разрезу – это афанитовые породы, постепенно переходящие в афировые атачиты с игольчатыми вкрапленниками полевого шпата. Еще ниже атачиты сменяются плагиоклаз-порфириновыми трахиандезитами.

Впервые мнение об интрузивной природе порфиритов (порфириновых базальтоидов) было высказано еще академиком А.Н. Заварицким. Детально изучив гору Магнитную, он писал: "...Главная масса Атача, разделяющая месторождение на два поля, образована лакколитообразным телом, сложенным внизу лабрадоровым порфиритом, переходящим кверху в олигоклазовый и затем – в атачит..." [13]. Позднее это было подтверждено исследованиями А.В. Говоровой [8]. Был сделан вывод о том, что порфириты лежачего бока месторождения горы Магнитной представляют собой дифференцированную субинтрузивную залежь, сложенную в нижней своей части пироксеновыми порфиритами, которые вверх по разрезу постепенно сменяются пироксен-плагиоклазовыми, а еще выше – плагиоклазовыми порфиритами. Наши полевые наблюдения полностью подтвердили эту точку зрения. Изучение горы Атач и стенок карьеров Магнитогорского месторождения показало, что порфириты, слагающие субинтрузию, через атачиты, как породы "краевой группы", имеют активный контакт с вмещающими известняками [2, 19]. Атачиты инъецированы в известняки в виде крупных и мелких апофиз (силлы, дайки, прожилки).

В разрезе Магнитогорского месторождения порфириты располагаются гипсометрически ниже известняков C₁t-v₁. Согласно стратиграфическому положению возраст порфиритов принимается некоторыми исследователями как позднедевонский (D₃f) [27, 35] с отнесением их к колтубанской свите [30]. Продукты вулканизма фаменского возраста, фрагменты разрезов которых вскрыты в карьере месторождений Мал. Куйбасс и на борту карьера Дальний месторождения скарново-магнетитовых руд [28], объединяются также в новоивановскую толщу трахибазальтов и шумихинскую толщу трахиандезитов и трахидацитов. При геологическом доизучении района Магнитогорского рудного поля в масштабе 1 : 25 000 В.М. Мосейчуком и др. в 1990 г. была выделена свита горы Магнитной (D₃-C₁mg), которая и вмещает скарново-магнетитовые руды Магнитогорского и других месторождений [17].

Ранее определение возраста пород субинтрузии было проведено методом **Rb-Sr геохронологии**. Получены изохронные зависимости (рис. 1) с возраст-

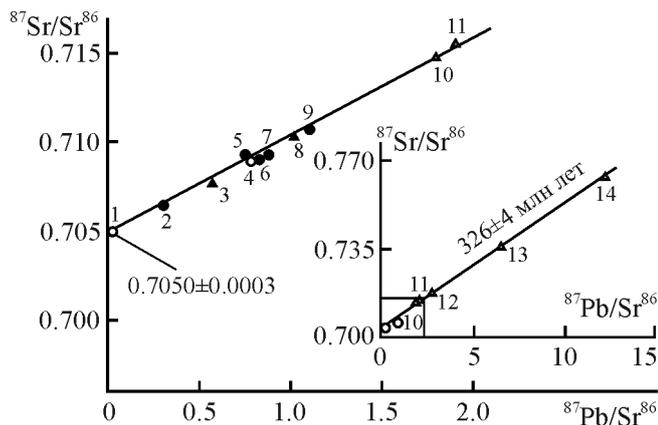


Рис. 1. Эволюционные диаграммы (Rb–Sr) для пород подрудной порфириновой интрузии на Магнитогорском месторождении по [29].

1 – плагиоклаз вкрапленников (скв. 21, гл. 114.5 м); 2 – порфириновый андезито-базальт (скв. 21, гл. 114.5 м, гора Магнитная); 3 – порфириновый андезито-базальт из обломка в аточите (гора Атач); 4 – плагиоклаз вкрапленников (скв. 3, гл. 890.7 м); 5 – крупнопорфириновый базальт (скв. 3, гл. 890.7 м, в 4.5 км к ЮЗ от горы Магнитной); 6 – порфириновый андезито-базальт (скв. 2056, гл. 408.0 м, в 1.5 км к востоку от горы Магнитной); 7 – порфириновый андезито-базальт (скв. 21, гл. 180.0 м); 8 – порфириновый базальт из крупного блока в аточите (карьер Дальний, придонная часть, под известняками); 9 – порфириновый пироксеновый базальт (скв. 2009, гл. 892.5 м, в 1259 м к западу от горы Магнитной); 10 – атачит (карьер Главный, восточный борт, под рудой); 11 – атачит вмещающий крупные обломки порфириновых базальтов (карьер Дальний, придонная часть, под известняками); 12 – атачит (карьер Главный, восточный борт, под рудой); 13 – атачит, там же; 14 – атачит (карьер Дальний, западный борт, полого лежащее пластообразное тело между крупнопорфириновыми базальтами внизу и мелкопорфириновыми – сверху).

Fig. 1. Evolutionary plots (Rb–Sr) for rocks of under-ore porphyritic intrusion at Magnitogorsk deposit after [29].

1 – plagioclase phenocrysts (borehole 21, depth 114.5 m); 2 – porphyritic andesite-basalt (borehole 21, depth 114.5 m, Mount Magnitnaya); 3 – clast of porphyritic andesite-basalt in atachite (Mount Atach); 4 – plagioclase phenocrysts (borehole 3, depth 890.7 m); 5 – megaphyric basalt (borehole 3, depth 890.7 m, 4.5 km to the southwest of Mount Magnitnaya); 6 – porphyritic andesite-basalt (borehole 2056, depth 408.0 m, 1.5 km east of Mount Magnitnaya); 7 – porphyritic andesite-basalt (borehole 21, depth 180.0 m); 8 – large block of porphyritic basalt from the atachite (Dalny quarry, the bottom part under limestone); 9 – pyroxene porphyritic basalt (borehole 2009, depth 892.5 m, 1259 m to the west of Mount Magnitnaya); 10 – atachite (Glavnyi quarry, east side, under the ore); 11 – atachite accommodating large fragments of porphyritic basalts (Far (Dalnyi) quarry, the bottom part, under the limestone); 12 – atachite (Glavnyi quarry, east side, under the ore); 13 – atachite, at the same place; 14 – atachite (Dalnyi quarry, west side, lying tabular gently sloping body between mega-porphyrific basalts below and fine-porphyrific ones above).

том 319–335 млн лет, что отвечает серпуховскому веку раннего карбона [29]. В подборку материала для построения изохроны были включены образцы, отобранные на территории Магнитогорского месторождения, не содержащие признаков окколорудного метаморфизма и метасоматических преобразований.

Порфирировая субинтрузия прорывается породами Магнитогорского габбро-гранитного комплекса, возраст которого составляет 330–340 млн лет [24, 36], что соответствует верхнему возрастному пределу формирования субинтрузии.

Наибольшую мощность (около 1000 м) порфирировая субинтрузия имеет в центральной части Магнитогорского месторождения (скв. 2009). Скважина пробурена со дна карьера, непосредственно под Главной рудной залежью и остановлена в габбро-гранитной брекчии на глубине 1794 м. Здесь субинтрузия имеет полный дифференцированный разрез, представленный всеми группами ранее перечисленных пород. На флангах месторождения мощность субвулканической залежи меньше и составляет около 500 м, при этом значительно сокращены мощности слагающих ее пород, и, кроме того, в разрезе отсутствуют отдельные их типы.

Ранее на Магнитогорском месторождении уже были изучены некоторые особенности распределения петрогенных, рудных и летучих компонентов (галогены в апатите) в разрезе субинтрузии [4, 5]. Установлено, что содержание SiO_2 в породах вверх по разрезу интрузии увеличивается. В пироксенпорфириновых базальтах основания содержание SiO_2 составляет 44–51 мас. %, а в вышележащих порфиритах и аточитах возрастает от 52 до 60–61 мас. %, при росте содержания К, Na, а также Rb, Sr, P. В апатитах синхронно происходит рост содержания F, на фоне резкого снижения концентраций Cl, с максимумом его содержания (до 2.5–3.0 мас. %) в апатите из пироксенпорфириновых базальтов основания. Более детальная характеристика минерального состава пород порфирировой интрузии приведена в [5].

АТАЧИТЫ И ВНУТРИИНТРУЗИВНЫЕ “ОБЛОМОЧНЫЕ” ПОРОДЫ В СОСТАВЕ ПОРФИРИТОВОЙ СУБИНТРУЗИИ

Атачиты. Эти породы впервые описаны И.А. Морозевичем [18]. Он назвал их по горе Атач, расположенной в центре Магнитогорского месторождения. А.Н. Заварицкий, изучая гору Магнитную, пришел к заключению, что это интрузивные брекчии, активно воздействующие на известняки C_1 и принадлежащие, вместе с лежащими ниже порфиритами, одному лакколитообразному телу [13]. По мнению других исследователей, атачиты – это

отложения грязевого потока вулканической природы [9]. Наши полевые наблюдения полностью подтвердили точку зрения А.Н. Заварицкого об интрузивной природе атачитов и их связи с порфиритовой интрузией. Постепенность перехода афанитовых атачитов в порфириты впервые также была отмечена А.Н. Заварицким [13].

На горе Атач атачиты залегают в виде пласта переменной мощности (30–50 м). Они представляют собой обломочную темно-серого цвета породу с неоднородной тонкообломочной основной массой, включающей более крупные обломки порфиритов размером до 10–15 см, редко, до 40 см. Иногда крупнообломочные атачиты залегают непосредственно на порфиритах, но иногда они переходят в тонкообломочные атачиты с размером расплавных частиц 2–3 мм. Мощность тонкообломочных атачитов составляет 2–3 м, цвет – от темно-серого до черного, иногда наблюдается структура течения.

При изучении разреза скв. 2009 были отмечены две позиции залегания атачитов:

1) в виде пласта, перекрывающего порфириты; 2) в виде жил, даек, секущих эти порфириты. Первые залегают на порфиритах, образуя залежь мощностью 36 м. На контакте атачитов с известняками отмечена скарновая зона, мощностью 7.4 м, выше которой располагается толща известняков, участками брекчированных и мраморизованных, мощностью 66 м. Жильные атачиты наблюдались на глубине 343 м в виде дайки мощностью 60 см среди плагиоклаз-порфириновых базальтов. Отмечены они в 1.5–2 км западнее горы Магнитной, в скв. 807 на глубине 700 м среди пироксен-порфириновых базальтов и в скв. 808 – на глубине 400 м, в области границы между пироксен-порфириновыми и пироксен-плагиоклазовыми базальтами.

Жильный атачит представляет собой породу, сложенную частицами расплавленного материала размером от долей миллиметра до 2–3 мм. Частицы имеют овальные очертания, либо по форме напоминают фьямме с неровными обрывистыми краями. Во многих из них наблюдается эмульсионная структура, обусловленная обособлением флюидных компонентов в самостоятельную минеральную фазу, раскристаллизованную впоследствии в виде карбонат-эпидот-альбитового агрегата. Минералы этого агрегата заполняют также интерстиции между расплавленными частицами, образуя скопления и прожилки. По структурно-текстурным особенностям жильные атачиты идентичны цементирующей массе крупно- и среднеобломочных атачитов из верхней части субинтрузии.

По существу атачиты – это производные легкоподвижного флюидонасыщенного расплава, который в зонах взрывной дезинтеграции и последующей быстрой кристаллизации приобрел структурно-текстурные особенности, характерные для флюидизатов. Благодаря своей высокой теку-

чести, атачиты образовали многочисленные инъекции в породы рудовмещающей толщи Магнитогорского скарново-магнетитового месторождения. Поэтому полученный фактический материал позволяет нам отнести атачиты к флюидизатам [3]. Ранее, флюидизаты как особый класс магматических образований были выделены на Полярном Урале [10, 11]. Своеобразие этих пород, по мнению И.И. Голубевой, заключается "...в специфическом механизме перемещения интрузирующего материала и необычном многообразии текстурно-структурных особенностей и вещественного состава...". Ведущая роль в формировании атачитов принадлежит флюидной или газовой фазе, обособление которой обусловлено взрывным выделением растворенных в магме летучих компонентов. Этот процесс определяется лишь степенью падения внешнего давления, по мере подъема магмы на более высокие уровни земной коры. Интенсивная дегазация магмы в камере может происходить и на относительно больших глубинах, но в определенной тектонической обстановке, например, в связи с тектоническими разломами. Поэтому, флюидизаты могут находиться как в интрузивной, так и в эффузивной форме. Например, флюидизаты эффузивной фации могут иметь такой же текстурный облик, как и подобные им породы, находящиеся в виде даек или силлов, т.е. текстурно-структурные особенности этих пород не зависят от фациальных условий их формирования.

Внутриинтрузивные "обломочные породы". При изучении вертикального разреза субинтрузии мы обратили внимание на двойственный характер контакта между пироксен-порфириновыми базальтами и пироксен-плагиоклазовыми базальтами. В одном случае между ними отмечался постепенный переход, в другом – они были разделены толщей обломочных порфиритов мощностью 200–300 м. Ранее местные геологи рассматривали эту толщу как туфоогенно-осадочные образования, отделяющие пироксеновые порфириты франского возраста от пироксен – плагиоклазовых и плагиоклазовых порфиритов фамена.

Первый тип контакта наблюдался при изучении разреза в скв. 807 на глубине 1285 м (в 2 км к западу от горы Магнитной), где визуально был отмечен постепенный переход между этими типами порфиритов [8]. С целью получения количественной характеристики явлений дифференциации А.В. Говоровой были проведены систематические определения удельного веса пород в вертикальном разрезе субинтрузии. В зонах перехода от одного типа порфирита к другому ею зафиксированы заметные изменения в удельном весе пород. Так, при переходе от плагиоклазовых порфиритов к пироксен-плагиоклазовым удельный вес породы постепенно увеличивался от 2.75 до 2.80 г/см³, а переход от пироксен-плагиоклазовых к пироксеновым порфи-

ритам отражен скачком в увеличении удельного веса от 2.80 до 2.95 г/см³.

Другой тип контакта наблюдается в скв. 2009. Здесь, между пироксеновыми и пироксен-плагиоклазовыми базальтами залегает толща обломочных порфиритов мощностью около 200 м. Обращает на себя внимание выдержанный состав обломков, соответствующий, как нижележащим, так и вышележащим порфиритам. В верхней части толщи в составе обломков преобладают пироксен-плагиоклазовые и плагиоклазовые базальты. Размер обломков – от 0.5 мм до 2–3 см и более, нередко они имеют овальные очертания. В некоторых из них наблюдается эмульсионная структура, обусловленная обособлением гидротермальных минералов (карбонат, хлорит и др.). Материал, цементующий обломки, содержит карбонат, хлорит, цеолиты и гематит, количество которого иногда бывает весьма значительным. Ниже по разрезу обломки пироксен-плагиоклазовых порфиритов исчезают и порода приобретает облик автомагматической брекчии пироксенового порфирита, которая постепенно переходит в массивные пироксеновые порфириты. Эти данные свидетельствуют о том, что при продвижении магматической колонны на более высокий уровень земной коры в магматической камере возникла декомпенсация, связанная с резким падением давления. В результате мгновенного (взрывного) высвобождения газовой флюидной фазы и была сформирована толща обломочных порфиритов, которые, по-видимому, также являются образованиями флюидизатного типа [5].

ПЕТРО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД В РАЗРЕЗЕ ПОРФИРИТОВОЙ СУБИНТРУЗИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ МАГНИТОГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

1. Особенности распределения петрогенных компонентов и элементов-примесей в разрезе субинтрузии

Изучение распределения петрогенных компонентов и элементов-примесей в вертикальном разрезе субинтрузии по типам пород, а также взаимосвязей петро-геохимических особенностей пород с составом галогенов в акцессорном апатите позволило установить ряд закономерностей. Распределение петрогенных элементов в разрезе интрузии по данным скв. 2009 показано на рис. 2. Видно, что для пироксеновых порфиритов, находящихся в основании, характерны наиболее высокие содержания MgO и CaO, а также преобладание высоких концентраций суммарного железа (FeO + 0.9Fe₂O₃) до 10–12 мас. %. Вверх по разрезу содержания этих петрогенных компонентов закономерно понижаются, а концентрации всех других (Al₂O₃, SiO₂,

K₂O + Na₂O, TiO₂, P₂O₅, MnO) – увеличиваются (табл. 1). Максимум концентраций щелочей, алюминия, фосфора и фтора (в апатите) наблюдается в составе атакитов из верхней части интрузии. Среди них выделяются две разновидности: более калиевые и обогащенные натрием.

В составах пород по всему разрезу отмечают некоторые отклонения в содержаниях MgO, CaO, Al₂O₃ и ряда других петрогенных элементов (см. рис. 2). Это обусловлено присутствием в разрезе участков с более тонким переслаиванием пород. Например, среди плагиоклазовых порфиритов средней части разреза появляются небольшие прослои пироксен-плагиоклазовых порфиритов, а среди нижележащих пироксеновых порфиритов основания отмечены прослои пироксен-плагиоклазовых порфиритов (см. табл. 1).

По химическому составу (см. табл. 1) внутриинтрузивная обломочная толща, охарактеризованная выше, закономерно вписывается в эволюционный тренд пород данной дифференцированной интрузии (см. рис. 2). При этом, обломочные порфириты в нижней части толщи по содержанию основных петрогенных компонентов (MgO, CaO, Al₂O₃ и др.) полностью аналогичны нижележащим массивным Rх-порфиритам. Вместе с тем, можно отметить некоторую обогащенность их фосфором и кальцием, при дефиците щелочей. Увеличение разброса содержаний петрогенных элементов в зоне внутриинтрузивной брекчии обусловлено присутствием гидротермальных минералов, характерных для областей дезинтеграции флюидизированной магмы.

Приведенные выше данные, в целом, свидетельствуют о комагматичности всех типов пород интрузии Магнитогорского месторождения. Дифференциация исходного расплава проходила, по-видимому, с накоплением (кумуляцией) моноклинного пироксена в нижней части субинтрузии, а плагиоклаза – в верхней. При этом, в нижней части интрузии первоначально был заметный дефицит воды. Кристаллизация здесь происходила в сухой системе, при высокой температуре, поэтому в обогащенном хлором придонном расплаве кристаллизовался богатый хлором высокотемпературный апатит.

В целях получения более детальной информации об условиях кристаллизации отдельных групп пород, слагающих разрез интрузии, была дополнительно проведена разбивка их составов по классам кремнекислотности (табл. 2). Было установлено, что каждая группа пород отвечает нескольким классам кремнекислотности. Так, пироксен-порфириновые базальты основания по составу отвечают двум классам кремнекислотности: 44–50% SiO₂ и 50–52% SiO₂. У залегающих выше пироксен-плагиоклазовых и плагиоклазовых порфиритов, андезито-базальтов и атакитов имеется по три одинаковых класса: 50–52% SiO₂, 52–56% и 56–60% SiO₂. При этом, у всех типов пород, залегающих на

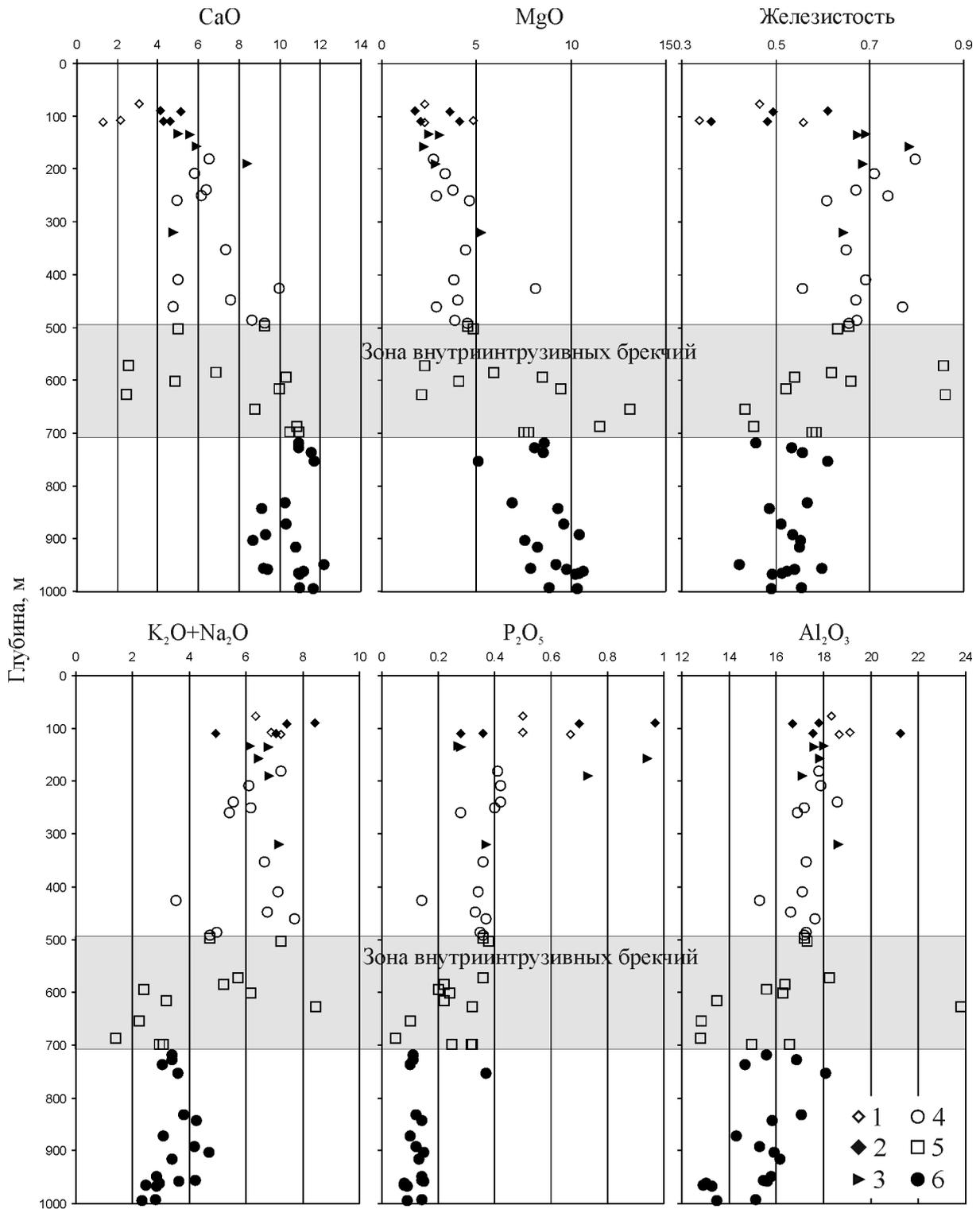


Рис. 2. Распределение петрогенных элементов в разрезе порфириновой интрузии по скважине 2009 на Магнитогорском месторождении.

1 – калиевый атачит, 2 – натриевый атачит, 3 – плагиоклазовый порфирит, 4 – пироксен-плагиоклазовый порфирит, 5 – внутриинтрузивная брекчия порфиритов, 6 – пироксеновый порфирит. Все окислы в мас. %.

Fig. 2. Distribution of major elements in drill log of porphyritic intrusion of borehole 2009 in Magnitogorsk deposit.

1 – potassium atachite, 2 – sodium atachite, 3 – *Pl* porphyrite, 4 – *Px-Pl* porphyrite, 5 – intra-igneous porphyritic breccia, 6 – *Px* porphyrite. All oxides in wt %.

Таблица 1. Состав пород в разрезе порфировой интрузии в скважине 2009 (мас. %)**Table 1.** Composition of the rocks in the section of porphyritic intrusion in borehole 2009 (wt %)

№ п/п	Глуб., м	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	П.п.п.	Сумма
1	77	57.39	1.06	18.33	8.35	0.03	2.28	3.09	1.33	5.00	0.50	3.00	100.36
2	89	54.02	1.27	17.80	9.52	0.04	1.73	4.12	4.74	3.68	0.97	1.87	99.76
3	90.5	56.50	1.12	16.69	7.53	0.09	3.59	5.12	5.23	2.21	0.70	1.82	100.61
4	107.5	54.76	1.00	19.10	8.00	0.05	4.82	2.14	1.65	5.25	0.50	3.00	100.24
5	109.6	52.74	1.12	21.23	7.50	0.04	4.13	4.28	3.29	3.76	0.37	1.78	100.23
6	110.5	61.03	0.82	17.56	6.70	0.07	2.04	4.61	3.66	1.28	0.28	1.73	99.80
7	111	54.32	1.72	18.64	12.20	0.03	2.28	1.29	2.11	5.11	0.67	2.10	100.42
8	133	59.91	0.79	18.01	5.55	0.05	2.48	4.97	2.86	3.28	0.27	1.59	99.76
9	135	57.94	0.86	17.57	6.23	0.03	3.02	5.54	3.38	3.41	0.28	1.52	99.78
10	157	55.69	1.08	17.85	8.00	0.05	2.21	5.88	2.93	3.50	0.94	1.65	99.78
11	181.5	51.73	1.14	17.79	10.70	0.09	2.74	6.52	2.53	4.70	0.41	1.46	99.81
12	191	56.40	1.10	17.10	6.20	0.02	2.84	8.37	6.40	0.41	0.73	0.68	100.25
13	208.5	54.82	1.13	17.87	8.06	0.07	3.33	5.82	3.15	2.93	0.42	2.17	99.77
14	239	53.57	1.21	18.58	7.71	0.11	3.77	6.37	3.37	2.18	0.42	2.48	99.78
15	250	56.14	1.09	17.16	8.13	0.08	2.88	6.16	3.05	3.11	0.40	1.58	99.78
16	260	56.33	1.03	16.90	7.20	0.10	4.63	4.93	3.85	1.56	0.28	2.99	99.80
17	320	51.00	1.23	18.60	9.45	0.04	5.24	4.75	3.00	4.16	0.37	1.95	99.79
18	353	52.24	1.22	17.27	8.26	0.15	4.44	7.33	4.78	1.86	0.36	1.85	99.76
19	410	53.46	1.14	17.09	8.51	0.14	3.81	5.00	5.87	1.25	0.34	2.17	98.78
20	425.5	49.94	0.95	15.27	10.14	0.14	8.10	9.98	3.14	0.40	0.14	1.58	99.78
21	448	53.43	1.11	16.62	8.17	0.12	4.02	7.58	3.70	3.05	0.33	1.64	99.77
22	461	54.05	1.23	17.63	9.65	0.08	2.88	4.75	3.37	4.34	0.37	1.42	99.78
23	486	54.54	1.08	17.26	7.89	0.09	3.85	8.63	3.61	1.36	0.35	1.10	100.48
24	498	53.06	1.17	17.18	8.56	0.12	4.50	9.25	3.04	1.67	0.36	1.72	100.56
25	503.5	53.66	0.39	17.32	8.26	0.12	4.82	4.97	4.11	3.11	0.38	1.72	98.86
26	572	54.78	1.12	18.25	13.37	0.09	2.25	2.52	1.23	4.48	0.36	1.64	100.09
27	585	52.52	0.89	16.37	9.54	0.14	5.90	6.88	4.39	0.83	0.22	2.01	99.69
28	594.6	50.60	0.85	15.56	9.94	0.09	8.47	10.32	2.00	0.40	0.20	0.70	99.13
29	601	57.36	0.76	16.27	7.90	0.05	4.07	4.82	5.47	0.70	0.24	1.30	100.24
30	617	51.20	0.83	13.46	10.29	0.16	9.45	9.95	2.67	0.52	0.22	1.60	100.59
31	627.7	47.22	1.40	23.78	12.87	0.04	2.09	2.45	3.19	5.26	0.32	1.30	99.92
32	655	49.60	0.66	12.82	10.08	0.08	13.08	8.79	1.83	0.40	0.10	1.80	99.24
33	686.7	52.70	0.56	12.80	9.53	0.06	11.50	10.83	1.15	0.26	0.05	0.80	100.24
34	698.5	49.36	0.81	16.57	10.60	0.15	7.76	10.93	2.68	0.28	0.25	1.00	100.39
35	698.7	51.74	0.55	14.95	10.61	0.15	7.50	10.51	2.72	0.35	0.32	1.10	100.50
36	719.2	51.98	0.82	15.58	7.25	0.05	8.58	10.93	2.90	0.50	0.11	0.98	99.68
37	727.5	47.88	0.88	16.84	9.24	0.11	8.04	10.93	3.00	0.40	0.11	2.46	99.89
38	736	48.27	0.72	14.66	10.64	0.15	8.51	11.54	1.81	1.23	0.10	2.15	99.78
39	753.2	48.56	2.00	18.07	7.99	0.08	5.11	11.70	3.19	0.40	0.37	0.92	98.39
40	832	50.05	0.81	17.07	9.05	0.13	6.90	10.28	3.44	0.35	0.12	1.59	99.79
41	843.5	48.86	0.90	15.81	8.81	0.07	9.32	9.13	3.38	0.85	0.14	1.10	98.37
42	871.5	49.34	0.65	14.32	10.08	0.18	9.63	10.31	2.61	0.48	0.10	2.08	99.78
43	892.5	44.66	0.98	15.28	12.04	0.11	10.43	9.32	1.63	2.56	0.12	2.64	99.77
44	903	51.20	0.96	15.90	9.33	0.09	7.55	8.66	3.84	0.85	0.15	0.98	99.51
45	915	47.83	0.99	16.14	10.07	0.18	8.23	10.80	2.78	0.62	0.13	2.08	99.85
46	949.5	49.42	0.98	15.80	6.70	0.09	9.20	12.17	2.27	0.57	0.14	1.86	99.20
47	955.5	49.03	0.98	15.47	11.70	0.11	7.84	9.19	3.62	0.60	0.14	1.79	100.47
48	958	46.34	0.98	15.63	11.47	0.12	9.76	9.39	2.19	1.44	0.15	1.96	99.43
49	961	47.42	0.65	13.01	11.62	0.19	10.61	11.17	2.34	0.62	0.08	2.06	99.77
50	966	48.50	0.64	12.89	10.93	0.21	10.41	10.95	1.77	0.71	0.08	2.49	99.58
51	993.5	48.48	0.98	15.12	11.04	0.12	8.84	10.98	2.12	0.68	0.14	1.00	99.50
52	994.2	49.44	0.69	13.49	9.89	0.13	10.31	11.64	1.97	0.36	0.09	1.16	99.07

Примечание. 1–7 – атачит; 8–10, 12, 17 – плагиоклазовый порфирит (трахибазальт); 11, 13–16, 18–25 – пироксен-плагиоклазовый порфирит (базальт); 26–35 – обломочный порфирит; 36–52 – пироксеновый порфирит (базальт). FeO* – общее. Анализы выполнены рентгенофлюоресцентным методом в Институте геологии и геохимии УрО РАН (аналитическая группа под руководством Н.П. Горбуновой).

Note. 1–7 – atachite; 8–10, 12, 17 – plagioclase porphyrite (trachybasalt); 11, 13–16, 18–25 – pyroxene-plagioclase porphyrite (basalt); 26–35 – clastic porphyrite; 36–52 – pyroxene porphyrite (basalt). FeO* – total iron. XRF analysis is performed in the Institute of Geology and Geochemistry UB RAS (analytical group under the leadership of N.P. Gorbunova).

Таблица 2. Средний химический состав дифференциатов в вертикальном разрезе порфириновой интрузии Магнитогорского месторождения (мас. %)

Table 2. Average chemical composition differentiates in vertical cross section of porphyritic intrusion of Magnitogorsk deposits (wt %)

Компонент	1		2			3		
	44-50	50-52	50-52	52-56	56-60	50-52	52-56	56-60
SiO ₂	48.41	51.08	50.34	54.06	57.98	51.26	54.59	58.51
TiO ₂	0.82	0.86	1.17	1.13	0.92	1.29	1.30	1.12
Al ₂ O ₃	14.81	16.18	17.54	17.14	18.33	18.58	19.78	17.51
FeO*	10.17	8.54	9.58	8.62	6.02	10.61	8.50	7.68
MnO	0.13	0.09	0.11	0.14	0.09	0.18	0.11	0.06
MgO	9.38	7.68	5.51	3.73	2.70	3.12	2.42	2.57
CaO	10.71	9.96	7.42	6.61	5.18	2.95	2.94	2.76
Na ₂ O	2.46	3.39	3.23	3.61	4.41	2.21	3.09	3.16
K ₂ O	0.70	0.56	2.63	2.67	2.02	6.61	5.76	4.50
P ₂ O ₅	0.11	0.12	0.38	0.38	0.34	0.53	0.46	0.39
∑	3.16	3.95	5.86	6.28	6.43	8.82	8.85	7.66
n	13	3	5	25	7	4	19	6

Примечание. 1 – пироксеновые порфиристы, 2 – пироксен-плагиоклазовые, плагиоклазовые порфиристы, 3 – атачиты; n – количество проб, представляющее данную выборку пород по классам SiO₂; FeO* – Fe общее; ∑_{щел} – Na₂O + K₂O.

Note. 1 – pyroxene porphyrites (basalts), 2 – pyroxene-plagioclase, plagioclase porphyrites (basalts), 3 – atachites; n – number of samples representing this selection of the rocks by grade SiO₂; FeO* – Fe total; ∑_{щел} – Na₂O + K₂O.

разных гипсометрических уровнях в разрезе интрузии, имеется один общий класс кремнекислотности – 50–52% SiO₂, но имеющий в каждом случае свою петрохимическую индивидуальность. Особенно значимы для выделенных классов кремнекислотности различия в концентрациях MgO, CaO, K₂O, P₂O₅, TiO₂ (см. табл. 2).

На основе данных таблицы 2 построены диаграммы (рис. 3), в которых показан характер распределения некоторых компонентов в разрезе интрузии. Обращает на себя внимание скачкообразное изменение содержания всех компонентов в интервале содержания 50–52 мас. % SiO₂ при переходе от пироксен-порфиристых базальтов основания интрузии к вышележащим более лейкократовым порфиристам и атачитам. При этом, внутри каждой группы пород с ростом SiO₂ концентрации MgO, CaO и FeO + Fe₂O₃ заметно снижаются, соответствуя трендам кристаллизационной дифференциации. Как видно из графиков, атачиты, занимающие самое высокое положение в разрезе интрузии, максимально обогащены щелочами, фосфором, титаном, железом, тогда как пироксен-порфиристые базальты ее основания обогащены магнием и кальцием.

Наиболее отчетливо дискретность проявлена в распределении K₂O и Na₂O в породах интрузии (рис. 4). В пироксен-порфиристых базальтах основания соотношение K₂O и Na₂O характеризуется прямой зависимостью (тренд I). Обратная зависимость между K₂O и Na₂O объединяет все другие группы пород, лежащих выше по разрезу (группа трендов II),

с ростом вверх по разрезу к атачитам диапазона вариаций содержаний как K₂O, так и Na₂O.

На рис. 5 и 6 дискретность в распределении TiO₂, MgO, P₂O₅ по группам пород выражена также отчетливо. На рис. 5 по соотношению TiO₂ и MgO выделяются два тренда. Тренд I отвечает составам пироксен-порфиристых базальтов основания, в которых относительно слабое увеличение содержания TiO₂ сопровождается более резким уменьшением MgO. В вышележащих порфиристах и атачитов на фоне дальнейшего снижения в них концентраций MgO вверх по разрезу и ростом содержания TiO₂ проявляется уже тенденция к значительным вариациям в содержаниях TiO₂ (группа трендов II).

Между пироксен-порфиристыми базальтами основания и вышележащими породами в распределении TiO₂ и P₂O₅ также сохраняется дискретность (см. рис. 6). Тренд I отражает изменение состава пироксен-порфиристых базальтов. Здесь слабый рост содержания P₂O₅ наблюдается на фоне более значительного роста концентраций TiO₂. Тренд II – отражает изменение составов вышележащих пород (порфиристов и атачитов). Здесь наблюдается уже преимущественный рост концентраций P₂O₅ на фоне относительно слабого роста содержания TiO₂. Таким образом, на всех рассмотренных графиках, именно пироксен-порфиристые базальты основания имеют свой четко выраженный автономный тренд составов, отличающийся своей направленностью от трендов всех вышележащих порфиристов и атачитов.

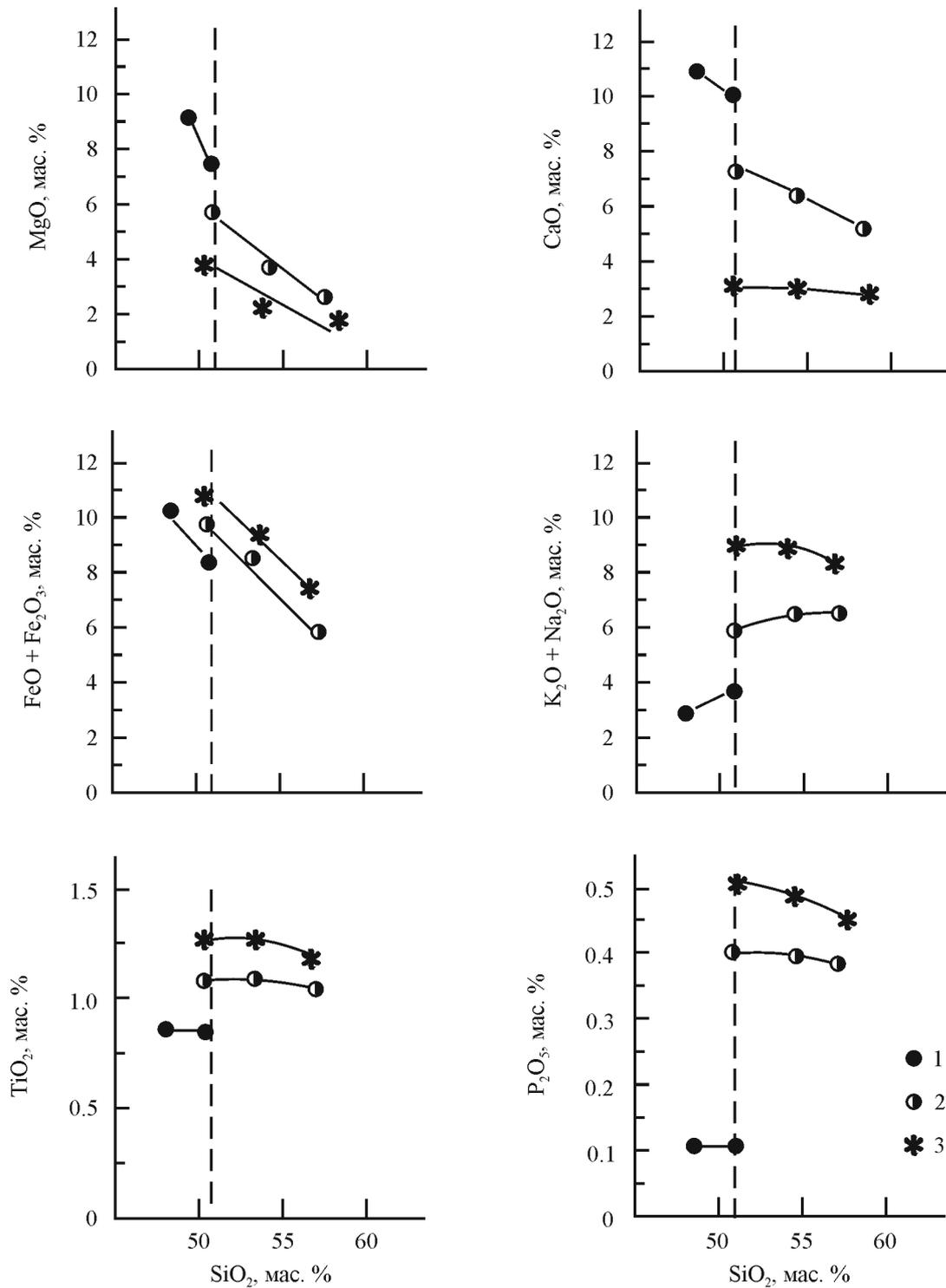


Рис. 3. Дискретное распределение петрогенных компонентов между породами нижней, средней и верхней частей разреза дифференцированной порфировой интрузии по данным табл. 1.

1 – пироксеновые порфириты – нижняя часть интрузии, 2 – пироксен-плагиоклазовые и плагиоклазовые порфириты – средняя часть; 3 – атачиты – верхняя часть интрузии.

Fig. 3. Discrete distribution of major components between the rocks of bottom, middle and upper parts of the section of differentiated porphyritic intrusions according to Table 1.

1 – pyroxene porphyrite – the lower part intrusion, 2 – pyroxene-plagioclase and plagioclase porphyrite – the middle part one, 3 – atachite – the upper part intrusion.

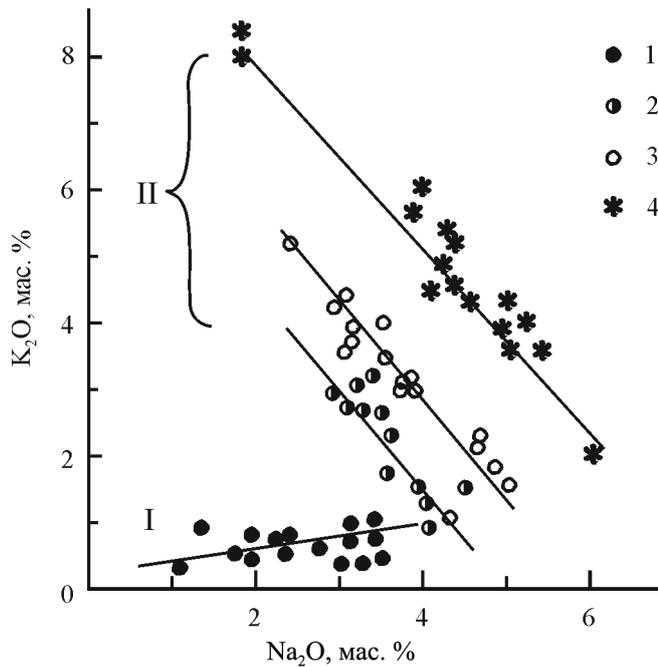


Рис. 4. Тренды распределения K_2O-Na_2O в породах нижней (I), средней и верхней (II) частей порфириновой интрузии.

1 – пироксеновые порфириты, 2 – пироксен-плагиоклазовые порфириты, 3 – плагиоклазовые порфириты; 4 – атачиты.

Fig. 4. Distribution trends of K_2O-Na_2O in the rocks of bottom (I), middle and upper (II) parts of porphyritic intrusions.

1 – pyroxene porphyrite, 2 – pyroxene-plagioclase porphyrite; 3 – plagioclase porphyrite. 4 – atachite.

Состав элементов-примесей в породах порфириновой интрузии приведен в табл. 3. Распределение элементов группы железа в породах показывает, что пироксен-порфириновые базальты, являясь более магнезиальными породами, содержат и более высокое количество хрома. Проявляется прямая зависимость в трендах $MgO-Cr$, $Nb-Zr$ и $Th-U$ (рис. 7), которые уже на геохимическом уровне подтверждают комагматичность всех типов дифференцированных пород интрузии. В то же время, на диаграммах $Cr-V$, $V-MgO$, $Co-MgO$ вновь проявляется дискретность, с четким разделением составов пород на два поля, одно из которых – составы пироксен-порфириновых базальтов (тренд I), второе – составы всех вышележащих групп пород (тренд II).

На рис. 8 показано нормализованное по хондриту [41] распределение РЗЭ в породах разреза порфириновой интрузии. Видна отчетливая дифференциация от пироксен-порфириновых базальтов основания интрузии с La/Yb_N отношением менее 2 до атачитов верхней части разреза, где данное отношение

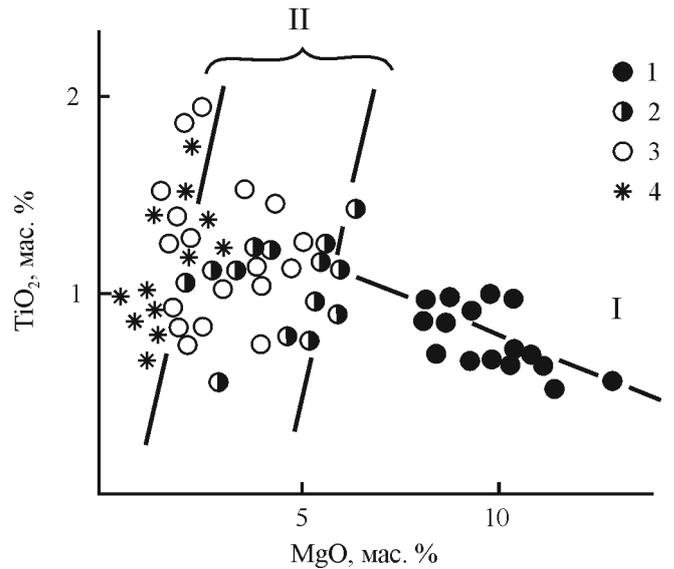


Рис. 5. Тренды распределения TiO_2-MgO в породах нижней (I), средней и верхней (II) частей порфириновой интрузии.

Усл. обозначения см. рис. 4.

Fig. 5. Distribution trends of TiO_2-MgO in the rocks of bottom (I), middle and upper (II) parts of porphyritic intrusions.

Legend see Fig. 4.

более 10. При этом сумма РЗЭ возрастает от 20 г/т в пироксеновых порфиритах основания до 100–150 в вышележащих пироксен-плагиоклазовых и плагиоклазовых порфиритах средней части и далее выше по разрезу до 250–830 в атачитовых верхней части интрузии. В пироксеновых порфиритах отмечается слабая положительная европиевая аномалия, а в вышележащих порфиритах и атачитовых – слабая отрицательная.

На дискриминационной диаграмме (рис. 9) породы порфириной интрузии образуют линейный тренд (обозначен пунктирной стрелкой), отражающий рост Nb/Yb и Th/Yb соотношений от пироксеновых порфиритов основания интрузии к атачитам. Тренд параллелен мантийной последовательности. По содержанию этих индикаторных элементов породы интрузии близки к обогащенному мантийному источнику, типа E-MORB. В этой же позиции, но ближе к мантийному тренду расположены базальты и габброиды каменноугольного Магнитогорско-Богдановского грабена [27], что указывает на меньшее содержание субдукционной компоненты в их составах. В отличие от них, типичные внутриплитные габброиды Кусинско-копанской интрузии [34] находятся на мантийном тренде. С этими особенностями согласуются и изотопные характеристики пород. В целом, для порфиринов интрузии характерны более высокие значе-

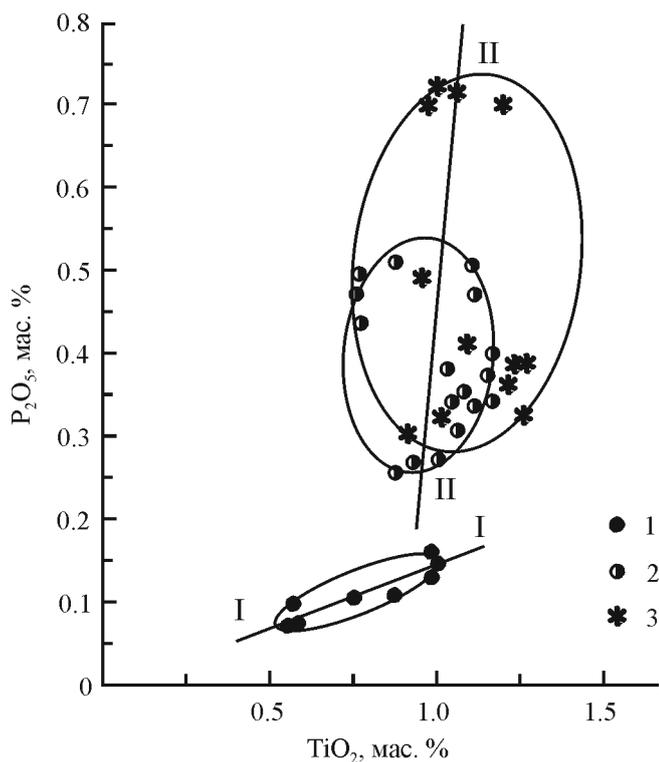


Рис. 6. Тренды распределения P_2O_5 - TiO_2 в породах нижней (I), средней и верхней (II) частей порфировой интрузии.

1 – пироксеновые порфириды; 2 – пироксен-плагиоклазовые и плагиоклазовые порфириды; 3 – атачиты.

Fig. 6. Distribution trends of P_2O_5 - TiO_2 in the rocks of bottom (I), middle and upper (II) parts of porphyritic intrusions.

1 – pyroxene porphyrite, 2 – pyroxene-plagioclase and plagioclase porphyrite, 3 – atachite.

ния ISr_{335} (0.70428), для атачитов 0.70599 [29]. Для Магнитогорского интрузивного габбро-гранитного комплекса величина ISr ниже (0.70313), что указывает на мантийный источник расплавов без привноса корового материала [12, 25]. Значения ϵNd_{326} также отражают контаминацию расплавом порфировой интрузии вмещающих карбонатных толщ и переработанной молодой уральской коры. Их значения варьируют от 6.2 в нижних горизонтах интрузии до 1.2 в атачитовых верхних частях (анализы выполнены в ИГГ УрО РАН, аналитики Н.Г. Солошенко, М.В. Стрелецкая). Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что источник расплава первоначально имел мантийные характеристики, однако при продвижении магмы к поверхности она была существенно обогащена коровым веществом.

2. Состав апатита как показатель расслоенности галоген-содержащей флюидной фазы в разрезе субинтрузии

Исследование содержаний Cl и F в акцессорных апатитах из пород в разрезе порфировой интрузии выявило четкую закономерность в распределении этих галогенов. Так, пироксен-порфировые базальты, слагающие основание интрузии, содержат апатит с наиболее высокими концентрациями Cl (в среднем 2.0 мас. %) и пониженным F (в среднем 0.55 мас. %). Вверх по разрезу содержание Cl в апатите заметно уменьшается, но растет содержание F. Так, в апатитах вышележащих пироксен-плагиоклазовых порфировых базальтов концентрации Cl составляют в среднем – 0.94 мас. %, F – 1.46 мас. %. В порфировых трахиандезитовых базальтах и атачитовых, слагающих верхнюю часть разреза, апатиты содержат в среднем 0.55 мас. % Cl и 2.0 мас. % F.

Таким образом, каждый тип пород имеет свой состав флюидной фазы, при этом наблюдается и постепенность перехода между ними (табл. 4, 5, 6). В каждой группе пород присутствуют апатиты с разным содержанием галогенов. В целом, по разрезу выделяются 4 типа апатитов с различным отношением Cl/F. Собственно хлористый I тип – ($Cl \gg F$, $Cl/F > 6$), II тип – ($Cl > F$, $Cl/F = 1.0-2.4$), III тип – ($F > Cl$, $Cl/F = 0.1-1.0$) и IV тип – ($F \gg Cl$, $Cl/F < 0.1$). Самые высокохлористые (до 2.8 мас. % Cl) апатиты I типа присутствуют только в пироксеновых порфировых базальтах основания (см. табл. 4). Апатиты II типа содержатся в породах, как нижней, так и средней частей разреза (см. табл. 4, 5). Апатиты III типа наблюдаются в породах средней и верхней частей разреза (см. табл. 5, 6). Апатиты IV типа присутствуют только в породах самой верхней части разреза – в атачитовых (см. табл. 6), особенно в тех из них, которые сопровождаются мушкетовит-гематитовым оруденением. Эти апатиты содержат минимальные концентрации хлора (0.05–0.22 мас. %) и по составу являются высокофтористыми (до 3.5 мас. % F). В породах средней части разреза выделяется еще один тип апатитов – (а), в котором содержания Cl и F близки, а отношение Cl/F составляет 0.94–1.0 (см. табл. 5).

Выделенные типы апатитов, их позиция в вертикальном разрезе интрузии, указывают на вероятное расслоение галоген-содержащей флюидной фазы по вертикали. При этом, составы апатитов (Cl, F) из нижележащих пироксеновых порфировых базальтов отличаются тем, что образуют свое автономное поле (рис. 10). При этом составы апатитов из вышележащих порфировых и атачитов образуют поля, перекрывающие друг друга с четкой тенденцией уменьшения концентраций хлора и ростом фтора вверх по разрезу. Таким образом, в распре-

Таблица 3. Содержание элементов-примесей в породах порфириновой интрузии, г/т

Table 3. Content of the trace elements in the rocks of porphyritic intrusion, ppm

№ п/п	Проба	V	Cr	Ni	Co	Rb	Sr	Ba	Zr	Y	Yb	Ce	Be	Sc	Nb	Hf	Th	U
1	104/2009	536.36	42.86	34.89	126.38	492.12	2146.14	11169.20	710.94	108.13	5.78	204.83	10.91	130.20	41.45	10.62	22.37	5.03
2	34.5/2056	771.84	10.45	21.81	69.20	1474.50	1266.07	3397.90	774.38	163.22	9.17	349.63	12.90	131.61	35.70	12.75	32.32	6.07
3	60/2056	86.63	8.64	6.46	32.93	148.60	478.35	1241.10	270.50	39.64	2.21	73.88	3.11	32.78	14.73	4.01	8.00	1.53
4	75.5/2056	33.80	2.72	3.34	30.53	278.18	475.21	908.74	328.96	39.84	4.92	95.50	3.96	33.56	28.27	8.48	18.71	2.31
5	47.5/2056	152.43	13.20	16.57	45.09	89.18	623.41	1416.40	1088.57	63.72	5.39	124.85	4.62	39.63	22.05	10.25	17.85	3.38
6	53/2056	155.96	22.00	13.14	70.19	497.91	870.30	3678.00	650.39	106.64	6.39	224.97	4.64	64.55	33.74	11.85	22.32	5.54
7	92/2056	242.92	46.72	25.91	58.26	90.86	392.26	687.49	204.28	31.72	1.68	54.71	2.29	37.44	11.40	3.15	5.21	1.25
8	104/88	421.42	124.80	44.90	70.76	577.15	219.91	1139.40	777.39	33.71	5.09	111.99	10.66	131.39	44.32	11.27	20.42	3.63
9	119.6/2056	339.87	60.29	29.60	61.67	99.20	518.32	758.81	236.21	33.71	1.97	57.95	2.88	53.25	12.74	3.52	6.09	1.49
10	123/2056	442.94	81.05	38.37	79.69	61.18	649.90	589.48	263.91	35.43	2.30	66.76	4.79	69.17	14.52	3.97	6.78	1.85
11	158/2056	437.38	124.50	40.92	55.89	83.13	673.55	605.21	192.25	28.54	1.54	57.38	4.35	63.66	11.70	2.97	5.75	1.09
12	168/2056	925.52	260.10	104.04	160.41	204.97	1431.53	1054.40	385.11	68.08	4.00	126.09	7.36	144.85	23.01	5.86	11.70	3.06
13	199/2056	523.70	154.50	61.38	91.66	83.92	517.68	435.18	177.00	23.32	1.39	41.36	3.07	55.94	9.86	2.81	3.78	1.42
14	133/2009	217.22	19.55	14.94	46.01	129.93	538.33	594.16	335.90	33.87	2.03	66.26	5.56	38.26	17.78	5.26	10.88	3.09
15	157/2009	299.28	65.74	32.16	51.59	123.89	639.57	909.07	255.65	37.93	2.04	60.74	4.55	54.05	14.33	3.83	6.49	6.27
16	239/2009	190.69	39.81	15.81	25.30	69.80	423.52	697.70	195.07	22.81	2.17	63.58	1.50	20.78	10.78	4.37	7.38	2.37
17	320/2009	373.16	94.15	45.06	71.00	163.65	485.08	468.77	196.71	29.32	1.68	44.79	2.96	63.30	10.92	3.11	5.00	1.33
18	181.5/2009	382.08	79.94	35.45	60.00	113.32	688.04	640.11	250.92	35.10	2.08	60.96	4.62	61.31	13.76	3.72	6.12	1.66
19	250/2009	376.52	84.72	36.09	48.15	135.25	607.77	955.14	258.90	34.55	1.90	60.60	3.90	58.54	14.13	4.06	6.42	1.85
20	260/2009	414.75	269.10	83.77	66.62	68.60	455.39	274.46	157.84	26.32	1.50	30.56	3.30	79.57	8.41	2.33	3.32	1.03
21	448/2009	450.08	118.50	44.33	70.44	88.13	561.56	659.88	206.19	32.04	1.88	49.69	3.09	63.49	10.50	3.06	4.58	1.36
22	736/2009	290.55	537.30	136.33	49.45	3.87	237.23	70.34	24.80	12.36	1.91	5.09	0.26	45.38	0.83	0.70	0.29	1.24
23	832/2009	234.02	96.49	40.16	46.98	7.93	270.40	56.65	34.01	14.93	1.47	13.00	0.35	39.53	1.21	0.91	2.22	0.17
24	871/2009	218.49	554.90	137.98	55.70	10.80	234.97	86.48	11.75	10.16	1.01	5.52	0.21	45.17	0.61	0.41	0.29	0.11
25	955/2009	232.11	237.10	72.41	38.30	4.86	628.38	73.67	11.01	13.75	1.28	6.45	0.35	38.13	1.06	0.49	0.19	0.09
26	974/2009	315.74	511.50	77.67	60.83	10.32	283.14	110.55	16.41	11.65	1.11	5.34	0.22	61.77	0.63	0.54	0.29	0.11
27	617/2009	311.28	534.10	79.51	38.71	15.56	338.85	143.62	40.66	19.48	1.71	29.94	0.46	43.87	2.80	1.01	0.70	0.35

Примечание. 1–8 – агатит, 9–17 – плагиоклаз-порфириновый трахитбазальт, 18–21 – пироксен-плагиоклаз-порфириновый базальт, 22–26 – пироксен-порфириновый базальт, 27 – обломочные порфирилы. Анализы выполнены методом ИСП-МС в Институте геологии и геохимии УрО РАН под руководством Д.В. Киселевой.

Note. 1–8 – atachite, 9–17 –plagioclase-porphyrific trachybasalt; 18–21 – pyroxene-plagioclase-porphyrific basalt; 22–26 – pyroxene-porphyrific basalt, 27 – clastic porphyrites. Analyses were carried out by Q-ICP-MS at the Institute of Geology and Geochemistry UB RAS under leadership D.V. Kiseleva.

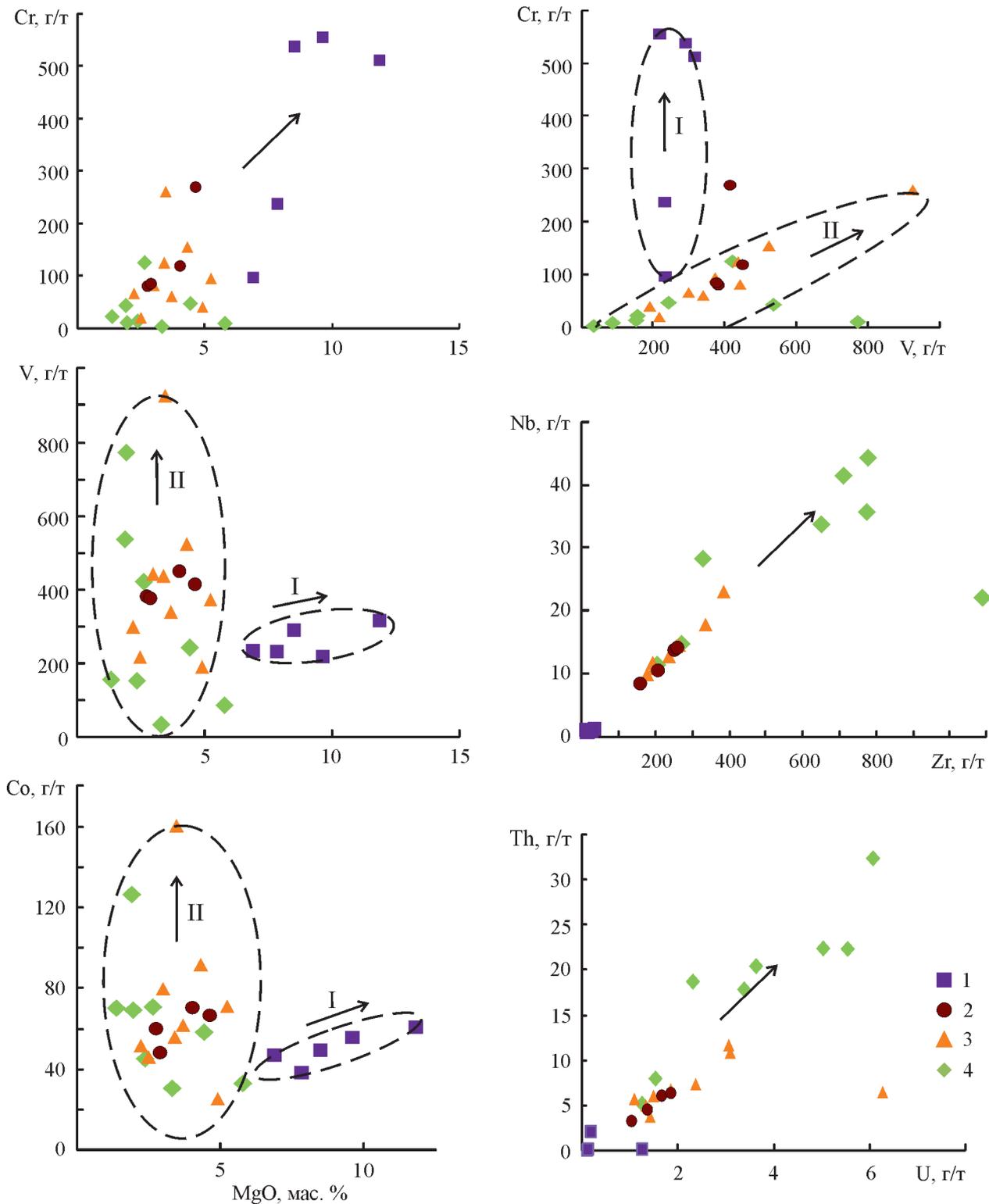


Рис. 7. Тренды распределения некоторых элементов в породах нижней (I), средней и верхней (II) частей порфировой интрузии.

1 – пироксеновые порфиристы, 2 – пироксен-плаггиоклазовые порфиристы, 3 – плаггиоклазовые порфиристы; 4 – атачиты.

Fig. 7. Distribution trends of some elements in the rocks of bottom (I), middle and upper (II) parts of porphyritic intrusion.

1 – pyroxene porphyrite, 2 – pyroxene-plagioclase porphyrite, 3 – plagioclase porphyrite, 4 – atachite.

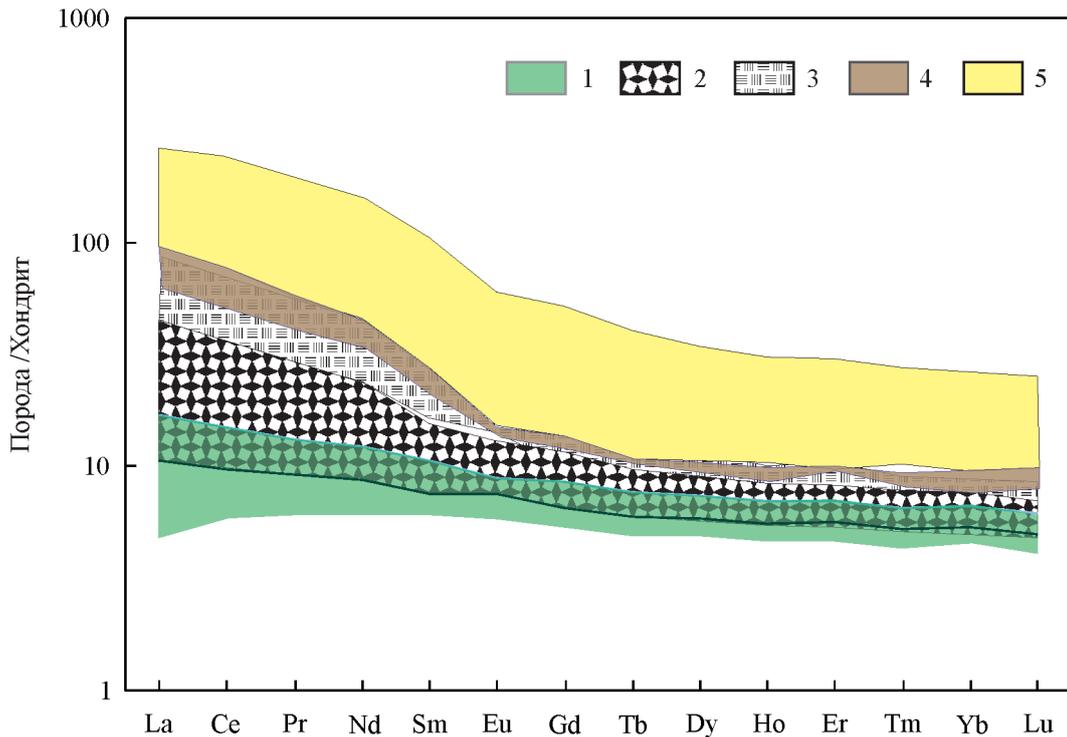


Рис. 8. Нормированное по хондриту [41] распределение РЗЭ в породах порфириновой интрузии.

1 – пироксеновые порфириты, 2 – внутриинтрузивная порфириновая брекчия, 3 – пироксен-плагиоклазовые порфириты, 4 – плагиоклазовые порфириты, 5 – атачиты.

Fig. 8. Chondrite-normalized [41] REE distributions for rocks of porphyritic intrusion.

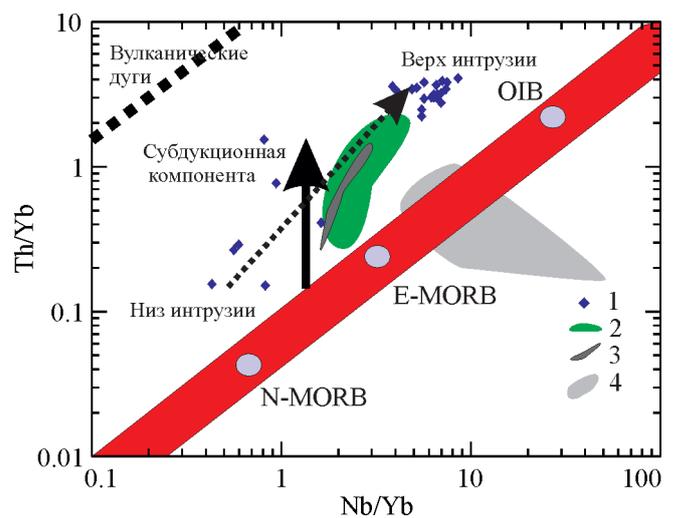
1 – pyroxene porphyrite, 2 – intra-igneous porphyritic breccia; 3 – pyroxene-plagioclase porphyrite, 4 – plagioclase porphyrite, 5 – atachite.

Рис. 9. Дискриминационная диаграмма Nb/Yb–Th/Yb для пород порфириновой интрузии в сопоставлении с другими структурно-вещественными комплексами пород Южного Урала.

1 – порфириновая интрузия, 2 – базальтоиды березовской и греховской свит по [27], 3 – габбро куйбасовского и богдановского комплексов по [27], 4 – габброиды среднерифейского Медведевского массива по [34]. Резервуары N-MORB, E-MORB и OIB по [42].

Fig. 9. Discriminatory chart Nb/Yb vs Th/Yb for rocks of porphyritic intrusion in comparison with other structural-material complexes of rocks of the Southern Urals.

1 – porphyritic intrusion, 2 – basalts of Berezovskaya and Grehovskaya suites at [27], 3 – gabbro of Kuybasovskiy and Bogdanovskiy complexes [27], 4 – gabbro of Medvedevskiy massif [34]. Reservoirs of N-MORB, E-MORB and OIB after [42].



деления галогенов в апатитах повторяется та же закономерность, которая была отмечена при рассмотрении составов пород в вертикальном разрезе интрузии.

Содержания S в апатитах из пород по всему разрезу очень малы и достигают лишь сотых долей процента. Исключение составил плагиоклаз-порфириновый трахиандезиобазальт, участками фер-

Таблица 4. Содержание галогенов в апатитах (мас. %) из пироксеновых порфиритов нижней части порфиритовой интрузии (скв. 2009)**Table 4.** Contents of halogens in apatites (wt %) from pyroxene porphyrites in the lower part of porphyritic intrusion (borehole 2009)

№ п/п	Размер и форма зерна апатита	Cl	F	Cl/F	Тип
1	Небольшое таблитчатое, n = 10	2.29	0.97	2.36	II
2	Небольшое гексагональное, n = 11	2.16	1.13	1.91	II
3	Мелкое таблитчатое, n = 9	1.68	1.22	1.37	II
4	Мелкое гексагональное, n = 4	1.79	1.07	1.67	II
5	Мелкое гексагональное, n = 11	1.60	0.86	1.86	II
6	Мелкое гексагональное, n = 10	0.67	0.95	0.70	III
7	Небольшое таблитчатое, n = 12	1.42	0.87	1.63	II
8	То же, n = 10	1.62	0.81	2.00	II
9	Крупное гексагональное, n = 4	2.78	0.12	23.16	I
10	Крупное таблитчатое n = 3	2.25	0.31	7.26	I
11	То же, n = 6	2.17	0.15	14.46	I
12	То же, n = 5	2.00	0.21	9.52	I
13	То же, n = 4	1.77	0.16	11.06	I
14	Небольшое таблитчатое, n = 8	1.71	0.26	6.58	I
15	Крупное гексагональное, n = 7	2.38	0.06	39.7	I

Примечание. 1–4 – глубина 736 м; 5–8 – 871 м; 9–13 – 915 м; 14–15 – 961 м; n – количество измерений в зерне.

Note. 1–4 – depth of 736 m; 5–8 – 871 m; 9–13 – 915 m; 14–15 – 961 m. n – the number of measurements in the grain.

Таблица 5. Содержание галогенов (мас. %) в апатитах из пироксен-плагиоклазовых порфиритов – средняя часть разреза порфиритовой интрузии (скв. 2009)**Table 5.** Contents of halogens of (wt %) apatite from pyroxene-plagioclase porphyrite – the middle part of porphyritic intrusion (borehole 2009)

№ п/п	Размер и форма зерна апатита	Cl	F	Cl/F	Тип
1	Мелкое во вкрапленнике плагиоклаза, n = 5	0.72	0.84	0.86	II
2	Мелкое во вкрапленнике пироксена, n = 4	0.98	0.98	1.00	II-a
3	То же, n = 5	0.62	1.37	0.45	III
4	То же, n = 10	0.54	1.80	0.30	III
5	Небольшое гексагональное, n = 11	0.52	1.53	0.34	III
6	Небольшое таблитчатое, n = 10	0.46	1.36	0.34	III
7	Мелкое таблитчатое, n = 8	0.90	0.94	0.96	II-a
8	То же, n = 8	1.05	1.11	0.94	II-a
9	Небольшое таблитчатое, n = 10	1.27	1.48	0.86	III
10	Мелкое таблитчатое, n = 9	1.33	1.63	0.81	III
11	То же, n = 5	1.59	1.46	1.09	II
12	Мелкое во вкрапленнике плагиоклаза, n = 3	0.71	1.63	0.44	III
13	Мелкое таблитчатое, n = 10	1.00	1.62	0.62	III
14	Мелкое во вкрапленнике плагиоклаза, n = 3	0.79	1.44	0.56	III
15	Небольшое во вкрапленнике плагиоклаза, n = 8	0.94	1.63	0.58	III
16	Небольшое гексагональное, n = 11	0.37	1.90	0.19	III
17	Большое таблитчатое, n = 14	1.79	1.40	1.28	II
18	Небольшое неправильной формы, n = 10	1.86	1.42	1.31	II
19	Небольшое треугольное, n = 11	1.08	1.64	0.66	III
20	Небольшое таблитчатое, n = 11	0.42	1.91	0.22	III
21	Небольшое таблитчатое, n = 12	1.98	1.60	1.23	II
22	Мелкое таблитчатое, n = 3	0.34	1.13	0.30	III
23	Мелкое гексагональное, n = 10	0.75	1.50	0.50	III
24	То же, n = 10	1.00	1.51	0.66	III
25	То же, n = 10	0.97	1.82	0.53	III
26	Мелкое таблитчатое, n = 10	0.89	1.62	0.55	III

Примечание. 1–3 – глубина 181.5 м; 4–6 – 208 м; 7–15 – 250 м; 16–21 – 320 м; 22 – 461 м; 23–26 – 486 м. n – количество измерений в зерне.

Note. 1–3 – depth of 181.5 m; 4–6 – 208 m; 7–15 – 250 m; 16–21 – 320 m; 22 – 461 m; 23–26 – 486 m. n – the number of measurements in the grain.

Таблица 6. Содержание галогенов в апатитах (мас. %) из атачитов с прослоями плагиоклазовых порфиритов – верхняя часть разреза порфиритовой интрузии (скв. 2009)

Table 6. Contents of halogens in apatite (wt %) from atachites interbedded with plagioclase porphyrite – the upper part of the section porphyrite intrusion (borehole 2009)

№ п/п	Размер, форма зерна апатита	Cl	F	Cl/F	Тип
1	Мелкое таблитчатое, n = 3	1.23	1.35	0.91	III
2	То же, n = 5	1.22	1.43	0.85	III
3	Мелкое, таблитчатое, n = 12	0.79	1.61	0.49	III
4	То же, n = 10	0.77	1.81	0.43	III
5	То же, n = 5	0.94	2.00	0.47	III
6	То же, n = 8	0.11	2.24	0.05	IV
7	То же, n = 8	0.42	2.38	0.18	III
8	Мелкое гексагональное, n = 11	0.08	3.53	0.02	IV
9	Мелкое таблитчатое, n = 9	0.05	2.08	0.02	IV
10	Небольшое таблитчатое, n = 11	0.19	2.11	0.09	IV
11	Небольшое призматическое, n = 10	0.65	3.10	0.21	III
12	Небольшое изометричное, n = 11	0.31	2.64	0.12	III
13	Небольшое гексагональное, n = 9	0.15	1.85	0.08	IV
14	Небольшое таблитчатое, n = 11	0.26	2.35	0.11	III
15	Большое гексагональное, n = 10	0.21	2.79	0.07	IV
16	Небольшое таблитчатое, n = 10	1.28	1.50	0.85	III
17	Небольшое гексагональное, n = 10	0.75	1.45	0.51	III
18	Небольшое изометричное, n = 10	0.34	2.34	0.14	III
19	Небольшое таблитчатое, n = 10	0.22	2.35	0.09	IV
20	Небольшое гексагональное, n = 18	0.32	1.97	0.16	III
21	Небольшое гексагональное, n = 12	1.12	1.41	0.79	III
22	Небольшое таблитчатое, n = 10	0.67	1.40	0.48	III
23	То же, n = 11	0.63	1.53	0.41	III
24	То же, n = 12	0.70	1.50	0.46	III

Примечание. 1–7 – атачит, глубина 75 м; 8–24 – плагиоклазовый порфирит: 8–13 – 104 м, 14–20 – 133 м, 21–24 – 157 м. Типы апатитов: III – хлористо-фтористый ($F > Cl$), Cl/F 0.1 – 1.0; IV – гидроксил-фтористый ($Cl \ll F$), $Cl/F < 0.1$; n – количество измерений в зерне. Все анализы по определению Cl и F в апатитах выполнены в ИГГ УрО РАН на микроанализаторе JXA-5. Аналитик Л.К. Воронина.

Note. 1–7 – atachite, the depth of 75 m; 8–24 – plagioclase porphyrite: 8–13 – 104 m; 14–20 – 133 m; 21–24 – 157 m. Types of apatite: III – chlorine-fluoride ($F > Cl$), Cl/F 0.1 – 1.0; IV – hydroxyl-fluoride ($Cl \ll F$), $Cl/F < 0.1$; n – number of measurements in the grain. All determinations of Cl and F in the apatite were made in IGG UB RAS by electron probe microanalyzer JXA-5, analyst L.K. Voronina.

ритизированный, залегающий в виде прослоя (мощностью 2.2 м) среди атачитов верхней части разреза. Здесь концентрация S в апатите оказалась на порядок ранее и составила 0.28 мас. %, при концентрациях Cl не превышающих 0.60 мас. %. Как отмечалось выше, именно с атачитами связана гематитовая минерализация и сульфидная вкрапленность. Следует отметить, что при широких вариациях содержания Cl в апатитах по разрезу интрузии, концентрации S остаются постоянно низкими и не превышают, как правило, 0.05 мас. %.

Таким образом состав апатита характеризует отчетливо проявленную тенденцию к расслоению галоген-содержащей флюидной фазы (Cl, F) по вертикали в разрезе субвулканической порфиритовой интрузии, с концентрацией Cl в апатитах основания интрузии, а F – в апатитах атачитов, завершающих ее разрез. Закономерное изменение содержания галогенов в апатитах вверх по разре-

зу коррелируется, как было показано ранее, с изменением петрохимических и геохимических особенностей пород, слагающих эту порфиритовую интрузию.

По соотношению галогенов (высоким концентрациям хлора) и отсутствию в них значительных концентраций сульфатной серы апатиты субвулканической порфиритовой интрузии близки к апатитам более поздней рудоносной магнитогорской габбро-гранитной серии. В последней, внутриплитные геохимические характеристики уже резко преобладают над надсубдукционными, отражая связь магматического источника с крупным астеносферным диапиром в зоне “slab-window” [33]. В предшествующих позднеостроводужных образованиях с медно-молибден-порфировым оруденением (верхнеуральский монцогаббро-диорит-сиенитовый комплекс) в апатитах, при меньших концентрациях хлора, наблюдаются существенно более

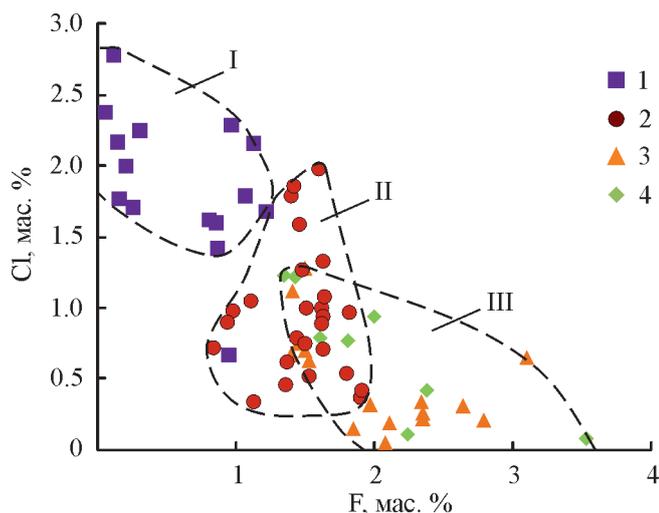


Рис. 10. Cl–F диаграмма для аксессуарных апатитов из различных пород порфировой интрузии Магнитогорского месторождения (скв. 2009).

1 – пироксеновые порфириды, 2 – пироксен-плагиоклазовые порфириды, 3 – плагиоклазовые порфириды, 4 – атачиты. I–III – нижняя, средняя и верхняя части разреза соответственно.

Fig. 10. Cl–F diagram for accessory apatite from various types of rocks from porphyritic intrusions of Magnitogorsk deposits (borehole 2009).

1 – pyroxene porphyrite, 2 – pyroxene-plagioclase porphyrite, 3 – plagioclase porphyrite, 4 – atachite. I–III – lower, middle and upper part of the section respectively.

высокие содержания сульфатной серы [32]. Хлор-сульфат-гидросульфидный состав флюидов характерен и для островодужных бимодальных вулканических комплексов с медноколчеданным оруденением.

3. Калиевый и натриевый типы афировых атачитов. Характеристика дифференциации, флюидной специализации и сопутствующей рудной минерализации в атачитовой части разреза субинтрузии

Одной из особенностей афировых атачитов является наличие или отсутствие в них тонкодисперсного гематита. Выделяются две разновидности атачитов: ферритизированный или “рудный” атачит и атачит безрудный, практически не содержащий рудной минерализации. “Рудный” атачит – это массивная, плотная порода, от темного до черного цвета, представляющая собой под микроскопом непрозрачный в проходящем свете железистый субстрат. Рудное вещество равномерно рассеяно по массе породы, но иногда оно сконцентрировано в виде четко выраженных струй, огибающих лейсты плагиоклаза, либо образующая скопления в виде мелких

линз и обособлений сферической формы. В обломочной разновидности атачита рудное вещество огибает отдельные лавокласты, а нередко его так много, что оно является цементом для них.

Концентрация железа в “рудном” атачите достигает 13.5 мас. %, а в некоторых случаях, например, на контакте с известняком – 22.0 мас. %. В последнем случае содержания кремнезема в нем минимальны – 34.27 мас. %. В надатачитовых скарных зонах отмечаются мушкетовит-гематитовые гнезда крупнозернистого сложения, в которых мушкетовит содержит до 0.01–0.04 мас. % TiO_2 и до 0.5 мас. % MnO [19]. Иногда на контакте афировых атачитов с мраморизованными известняками располагаются пласты (мощность 0.5 м и более) мушкетовит-гематитовых руд [2]. Здесь наблюдался постепенный переход от **Р1-порфириров к афировым атачитам**, на контакте которых с известняком сформированы мушкетовит-гематитовые руды. Руды содержат: пирит, халькопирит, арсенопирит, пирротин, сфалерит. Отмечаются также гнезда и линзы кальцита. Кроме обычного кальцита, по данным рентгеноструктурного и термического анализов, здесь содержатся марганцовистый кальцит и кальцит углеродсодержащий, черный и темно-серый цвет которого обусловлен тонкодисперсной примесью графита.

Выделенные типы атачитов имеют свои петро-геохимические особенности. Особенно значимо различие в содержаниях K_2O и Na_2O . “Рудные” атачиты – калиевые, безрудные – натриевые. В табл. 7 приведен средний химический состав этих пород. Калиевые “рудные” атачиты по сравнению с натриевыми безрудными содержат больше калия – 8.11 мас. % (против 3.62), железа – 9.80 мас. % (против 6.72), фосфора – 0.43 мас. % (против 0.20), на фоне более низких содержаний SiO_2 (55.12 мас. %). В них наблюдаются также более высокие концентрации рубидия – 200 г/т (против 123), ванадия – 132 г/т (против 56), кобальта – 26 г/т (против 14). Натриевые безрудные атачиты, наоборот, содержат больше натрия – 3.17 мас. % (против 1.76), магния – 2.82 мас. % (против 1.91), кальция – 2.36 мас. % (против 1.54) и п.п.п. – 3.0 мас. % (против 1.81). Они имеют более высокое содержание SiO_2 (59.25 мас. %). В них также больше стронция – 252 г/т (против 224) и бериллия – 1.8 г/т (против 0.9).

С петро-геохимическими особенностями состава атачитов четко коррелируется содержание галогенов (Cl, F) в **аксессуарном апатите (табл. 8)**. Апатиты натриевых атачитов содержат 0.72–1.55 мас. % Cl, а апатиты калиевых – 0.10–0.98 мас. % Cl (рис. 11). При этом, в последних содержания F выше и достигают 3.20 мас. % (против 1.73). В табл. 9 приведено содержание Cl, F в апатите из тонкого прожилка атачита с гематитовой минерализацией. Здесь концентрации Cl снижены до сотых долей

Таблица 7. Химический состав разных типов афировых атачитов, юго-восточный борт Дальнего и Главного карьеров, (мас. %)

Table 7. The chemical composition of different types of apyritic attachites, southeast edge of the Dalnii and Glavnii quarries, (wt %)

Компонент	Тип атачита	
	калиевый (potassium)	натриевый (sodium)
SiO ₂	55.12	59.25
TiO ₂	1.29	1.10
Al ₂ O ₃	18.76	18.10
FeO*	9.80	6.72
MnO	0.09	0.10
MgO	1.91	2.82
CaO	1.54	2.36
Na ₂ O	1.76	3.17
K ₂ O	8.11	3.62
P ₂ O ₅	0.43	0.20
п.п.п.	1.81	3.00
n	6	4

Примечание. FeO* – суммарное железо (0.9Fe₂O₃ + FeO); n – число проб.

Note. FeO* – total iron (0.9Fe₂O₃ + FeO); n – the number of samples.

Таблица 8. Содержание галогенов в апатитах из разных типов афировых атачитов (мас. %)

Table 8. Contents of halogens in apatites from different types of apyritic attachites (wt %)

№ п/п	Форма, размеры зерен апатита	Cl	F	Cl/F
Натриевый тип				
1	Таблитчатое, в основной массе, n = 4	1.46	1.05	1.30
2	Таблитчатое, n = 4	1.50	1.52	0.98
3	Крупное таблитчатое, n = 6	1.55	1.52	1.01
4	Гексагональное, n = 5	1.48	1.46	1.01
5	Таблитчатое, n = 5	1.42	1.73	0.82
Калиевый тип				
6	Мелкое в основной массе породы, n = 6	0.60	2.10	0.28
7	То же, n = 6	0.57	1.21	0.47
8	Таблитчатое зерно из скопления зерен апатита в основной массе породы, n = 5	0.98	1.31	0.75
9	Мелкое, в основной массе породы, n = 5	0.72	1.12	0.64
10	Игольчатое, около рудного скопления, n = 4	0.09	2.30	0.04
11	Мелкое зерно в основной массе, n = 5	0.19	3.20	0.05

Примечание. 1, 8, 9 – юго-восточный борт Дальнего карьера; 2–7, 10–11 – юго-восточный борт Главного карьера. Натриевый атачит, Cl/F – 0.82–1.30, II тип апатита; калиевый атачит, Cl/F – 0.28–0.75, III тип апатита; n – количество измерений в зерне.

Note. 1, 8, 9 – southeast edge of Dalnii quarry; 2–7, 10–11 – southeast board the Glavnii quarry. Sodium attachite, Cl/F – 0.82–1.30, II type of apatite; Potassium attachite, Cl/F – 0.28–0.75, III type of apatite; n – number of measurements in the grain.

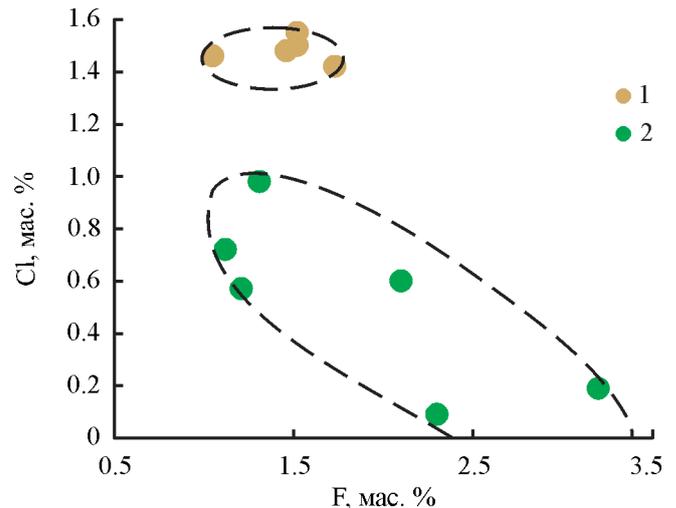


Рис. 11. Cl–F диаграмма для в аксессуарного апатита из разных типов атачитов.

Апатит из: 1 – натриевого атачита, 2 – калиевого атачита.

Fig. 11. Cl–F diagram for accessory apatite from different types of the attachites.

Apatite from: 1 – sodium attachite, 2 – potassium attachite.

Таблица 9. Содержание галогенов в апатитах из тонкого (1 см) прожилка атачита с гематитовой минерализацией на контакте с известняком (мас. %)

Table 9. Contents of halogens in apatite from thin (1 cm) vein of attachite with hematite mineralization at the contact with limestone (wt %)

№ п/п	Позиция включения, размеры	Cl	F	Cl/F
1	Мелкое зерно в основной массе, n = 5	0.17	1.86	0.09
2	То же, n = 3	0.12	1.89	0.06
3	То же, n = 3	0.06	2.40	0.03
4	То же, n = 3	0.04	2.48	0.02
5	То же, n = 5	0.18	3.21	0.05

Примечание. Юго-восточный борт карьера Дальний, горизонт 350–360 м. Апатит с отношением Cl/F < 0.1, IV тип. n – количество измерений в зерне.

Note. Southeast edge of Dalnii quarry; level 350–360 m. Apatite with a ratio Cl/F < 0.1. n – number of measurements in the grain.

процента (0.04–0.06%) при значительном содержании F (до 3.21%). Присутствие зональных кристаллов апатита, в которых центральная часть содержит больше Cl, чем краевые зоны, указывает на эволюцию галогенсодержащей флюидной фазы при формировании этих пород (табл. 10). В разных типах атачитов снижение концентраций Cl и увеличение F в апатитах четко коррелируется с ростом в них Ti, P, Fe, K и снижением концентраций Mg, Ca, Na, п.п.п. На основании этих данных можно предпо-

Таблица 10. Зональное распределение Cl и F в кристаллах апатита из атачитов (мас. %)**Table 10.** The zonal distribution of Cl and F in the crystals of apatite from atachite (wt %)

№ п/п	Форма зерна	Профиль	Cl	F	Cl/F	
I	Гексагональное	1	Край	0.76	1.91	0.40
		2	Центр	1.21	1.80	0.61
		3		1.14	1.65	0.69
		4		1.07	1.72	0.62
		5		1.19	1.79	0.66
		6		1.26	1.88	0.67
		7	Край	0.64	1.96	0.33
II	То же	1	Край	1.00	2.05	0.50
		2		0.79	1.87	0.42
		3	Центр	1.47	1.78	0.82
		4		1.64	1.81	0.91
		5		1.57	1.78	0.88
		6	Край	1.21	1.70	0.71
III	Таблитчатое	1	Край	0.82	1.45	0.56
		2	Центр	1.45	1.85	0.78
		3		1.44	1.81	0.80
		4		1.45	1.77	0.82
IV	То же	1	Край	0.62	2.10	0.30
		2	Центр	1.11	1.97	0.56
		3		1.14	1.73	0.66
		4		1.16	2.08	0.56

Примечание. I–IV – восточный борт карьера Дальний (скв. 2056, глубина 75.5 м); 1–7 – точки замера по профилям через зерна апатита.

Note. I–IV – eastern edge of Dalnii quarry (borehole 2056, depth 75.5 m); 1–7 – measuring points on the profiles through apatite grains.

ложить, что богатый щелочами, железом и галогенами атачитовый расплав в условиях пониженного давления разделился на два щелочных, комплементарных по калию, натрию и составу галогенов расплава. Один сконцентрировал в себе преимущественно Cl, Na, Ca, Mg, а второй, обогащенный F, K, Fe, P, занял более высокую позицию в атачитовом разрезе.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в атачитовой части разреза проявилась локальная флюидно-магматическая дифференциация – жидкостная несмесимость, при которой могли возникнуть две несмешивающиеся жидкости, отличающиеся по концентрациям основного солевого компонента: хлора и фтора [1, 7]. Следствием стало появление двух охарактеризованных выше типов атачитов.

В целом, данное локальное перераспределение компонентов в общих чертах согласуется с основным ведущим направлением дифференциации исходного расплава – его флюидно-магматической расслоенностью, представленной петрологическими типами пород, слагающими весь разрез порфириновой интрузии.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ полученных данных показал, что все разновидности пород, слагающих вертикальный разрез порфириновой интрузии, имеют два особых типа петро-геохимических характеристик и связанных с ними состав летучих компонентов (Cl, F, S), отраженный в составе апатита. В целом, вверх по разрезу субинтрузии происходит закономерное нарастание содержаний лейкократовых компонентов, таких как SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Na₂O, TiO₂ и P₂O₅ с одновременным снижением концентраций MgO и CaO. Это первая главная закономерность (см. рис 1, 2), отражающая процессы флюидно-магматической дифференциации и характеризующая комагматичность всех пород, слагающих данную интрузию.

Вверх по разрезу содержание Cl в апатите уменьшается и растет концентрация F. Самые высокие содержания Cl имеют апатиты в породах нижней части разреза интрузии, в пироксеновых порфиритах. В верхней части разреза апатиты из атачитов содержат максимальные концентрации F.

Наши исследования Cl, F в апатитах хорошо иллюстрируют тенденцию, ранее детально охарактеризованную на примере ряда классических расслоенных базит-гипербазитовых интрузий мира таких, как Стилуотер, Бушвельд и др. [40]. В них в связи со значительно большей мощностью и степенью дифференцированности интрузивных тел, процесс расслоения флюидной фазы по вертикали выражен значительно резче. В Стилуотере, например, концентрации хлора в апатитах из наиболее глубоких придонных и преимущественно ультраосновных по составу пород, с рудными залежами хромитов, сульфидами и платиноидами, часто достигают 6.5–7.0 мас. %, при минимальных концентрациях фтора (0–0.40 мас. %). В верхней части данных комплексов, сложенных продуктами интенсивной магматической дифференциации толеитового типа (феррогаббро и ферродиориты с пластами высокотитанистых титаномагнетитов), содержания хлора в апатитах резко понижены до 1.0 мас. % и менее, а фтора – повышены до 2.5 мас. % и более.

Охарактеризованные выше петро-геохимические характеристики подтверждают представление о том, что дифференцированные и расслоенные комплексы, рассматриваемые обычно как единые петрогенетические системы, в то же время в вертикальном сечении могут представлять собой ряд относительно автономных флюидно-магматических систем (ФМС), отличающихся друг от друга режимом летучих (вода, галогены и др.), составом, характером и масштабами сопутствующей эндогенной минерализации [16]. По сути это относится и к исследуемой нами дифференцированной порфириновой интрузии.

По характеру распределения петрогенных компонентов, с учетом выделенных классов кремне-

кислотности в разрезе порфиритовой интрузии, выделены две наиболее крупные группы пород. **Первая** слагает основание разреза субинтрузии. Она представлена пироксеновыми порфиритами (по составу это пироксен-порфириновые базальты). Породы в этой группе дифференцированы в диапазоне от 44 до 52 мас. % SiO_2 и имеют свой автономный петрохимический и геохимический тренд дифференциации. **Вторая группа** пород, залегающая выше по разрезу, представлена снизу вверх: пироксен-плагиоклазовыми и плагиоклазовыми порфиритами (по составу – это трахибазальт, трахиандезит) и атачитами (трахиандезит, трахиандезит, фонотефрит). В этой группе все разновидности пород дифференцированы в диапазоне от 50 до 60 мас. % SiO_2 и имеют другие тренды петро-геохимической дифференциации. Между этими двумя крупными и автономными по составу и условиям кристаллизации группами, в интервале содержаний 50–52 мас. % SiO_2 , наблюдается скачкообразное (дискретное) изменение содержаний MgO , CaO , K_2O , P_2O_5 , TiO_2 .

Характер распределения элементов-примесей в породах этих групп также подтверждает их индивидуальность, и в тоже время их несомненную генетическую общность. Так, на диаграммах V-MgO , Co-MgO , Cr-V , $\text{TiO}_2\text{-Zr}$ составы пироксеновых порфиритов основания (I группа) образуют свое автономное поле, со своим трендом дифференциации, а породы II группы, лежащие выше по разрезу – свое поле и свой тренд. В то же время на диаграммах Cr-MgO , Nb-Zr , Th-U составы всех пород объединены в единый тренд, что отражает генетическую связь пород между собой. Состав апатитов (Cl, F) в породах той и другой групп индивидуален, но вместе с тем, в целом, апатиты образует и общий тренд вверх по разрезу: от апатитов с наиболее высокими концентрациями Cl к апатитам с самыми высокими содержаниями F.

Автономность в распределении компонентов между этими двумя основными группами пород, имеющих свои индивидуальные тренды дифференциации, а также наличие в интервале 50–52 мас. % SiO_2 скачка содержаний таких компонентов, как MgO , CaO , $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$, P_2O_5 , TiO_2 , можно интерпретировать, как наличие раздела между этими двумя первично обособившимися расплавами, по-видимому, еще в докристаллизационный период. На этом раннем этапе первично единая петрогенетическая система при участии летучих распалась на две крупные относительно автономные ФМС. Это подтверждается и тем, что переход от пироксен-плагиоклазовых порфиритов к пироксеновым порфирирам отражен скачком в увеличении удельного веса от 2.80 до 2.95 г/см³. Продуктами кристаллизации одной из таких ФМС стали пироксеновые порфириты (по составу это Mg-базальты), слагающие основание субинтрузии.

В процессе дальнейшего флюидно-магматического расслоения другого обособившегося расплава, расположенного гипсометрически выше, возникла новая серия расплавов, раскристаллизованных впоследствии в мощный слой пироксеновых порфиритов, с редкими прослоями плагиоклазовых порфиритов. Выше по разрезу их сменяют уже собственно плагиоклазовые-порфириты. По составу это трахибазальты, трахиандезитбазальты и трахиандезиты. В верхней части разреза плагиоклазовые порфириты постепенно переходят в атачиты – породы наиболее богатые щелочами и летучими, соответствующие по составу трахиандезитбазальтам, трахиандезитам, фонотефритам.

Дискретное распределение некоторых компонентов (MgO , CaO , K_2O , P_2O_5 , TiO_2), было получено при экспериментальном расслоении ахондритового расплава [15]. Здесь скачок содержаний всех компонентов наблюдался при переходе стекла ультраосновного состава к основному в интервале содержаний 43–45 мас. % SiO_2 . Резкое изменение концентраций элементов при переходе межфазовой границы на профиле электронного микрондирования, как полагает Э. Реддер [23] служит одним из признаков проявления несмесимости расплавов.

Появление двух типов афировых атачитов, различных по содержанию щелочей и летучих, также связано с процессом локальной флюидно-магматической дифференциации (жидкостная несмесимость), проявленными в пределах верхней, наиболее лейкократовой и насыщенной щелочами и флюидами части (ФМС) интрузии. Эволюция ФМС тут сопровождалась процессом ферритизации расплава, обусловленным ростом окислительного потенциала, величина которого предопределялась достаточно высокой концентрацией щелочей и летучих. Согласно представлению [20, 21], ферритизация расплава – это перерождение железосодержащих силикатных расплавов, приводящее к обособлению рудной составляющей. С одной стороны, это накопившиеся при флюидно-магматическом расслоении щелочи K_2O , Na_2O , а с другой – CaO , обогативший расплав благодаря ассимиляции вмещающих известняков.

Богатый щелочами, летучими и железом атачитовый расплав в условиях пониженного давления разделился на два комплементарных по калию и натрию щелочно-флюидных расплава. Один сконцентрировал в себе преимущественно хлор, натрий, магний, известь и сформировался, как более тяжелый, на более низком гипсометрическом уровне, а второй, обогатившись более легкоподвижными компонентами, обогатился фтором, калием, рубидием, железом и ванадием. Продуктами кристаллизации в этой автономной ФМС стали с одной стороны – натриевые атачиты, обогатившиеся Cl, Na, Ca, Mg, Sr, а с другой – калиевые “рудные” ата-

читы, расположенные на более высоком уровне и обогащенные F, K, P, Rb, Fe, V, Ti.

Таким образом, здесь в магматическом процессе, на конкретном примере сосуществования двух типов атачитов, находит подтверждение фундаментальная геохимическая связь натрия с хлором, а калия с фтором, ранее детально охарактеризованная при флюидно-геохимической типизации процессов петрогенезиса и рудоносности на примере Урала [6, 32].

ВЫВОДЫ

Подводя итог, можно констатировать, что субвулканическая дифференцированная порфирировая интрузия на Магнитогорском скарново-магнетитовом месторождении является единой петрогенетической системой, в которой с участием флюидно-магматического взаимодействия происходило перераспределение галогенов, а также петрогенных и рудных элементов по вертикали (по типу расслоенных интрузий).

На самом раннем этапе формирования, в глубинных условиях, на фоне общего тренда дифференциации от пироксеновых порфиритов основания интрузии до атачитов (ее верхняя часть) при участии летучих произошло разделение исходного расплава на две составляющие. Образовались две крупные автономные флюидно-магматические системы (ФМС), различающиеся по распределению, как ряда петрогенных элементов (Mg, Ca, Ti, Fe, P, Na), так и многих элементов-примесей, а также составом галогенов в апатитах. Продуктами кристаллизации расплава, богатого хлором, а также Mg, Ca, Fe в одной из них стали пироксеновые порфириды (по составу Mg-базальты), слагающие основание субинтрузии. Выше по разрезу в другой более лейкократовой ФМС, происходил процесс дальнейшего неоднократного флюидно-магматического расслоения, продуктами кристаллизации которого стали пироксен-плагиоклазовые и плагиоклазовые порфириды (порфириновые трахибазальты, трахиандезибазальты и трахиандезиты), сменяющие вверх по разрезу друг друга с локальным переслаиванием на отдельных участках. В верхней, наиболее лейкократовой, насыщенной щелочами и флюидами, атачитовой части разреза (трахиандезибазальты, трахиандезиты, фонотефриты) произошло еще одно, локальное расслоение расплава на две составляющие. Продуктами флюидно-магматического расслоения стали с одной стороны натриевые атачиты, обогащенные Na, Ca, Sr с более высоким содержанием Cl в апатите, а с другой – калиевые “рудные” атачиты, расположенные на более высоком гипсометрическом уровне и обогащенные K, Rb, Fe, V, Ti, P, при более высоких содержаниях F в апатите.

Формирование субвулканической интрузии сопровождалось неоднократным проявлением эксплозивных явлений, обусловленных интенсивным выделением растворенных в магме летучих компонентов в результате падения внешнего давления при продвижении на более высокие уровни. Об этом свидетельствует присутствие в составе порфиритовой интрузии специфических пород обломочного строения – флюидизатов, сформированных вследствие взрывного отделения из магмы флюидных компонентов. В верхней части разреза это “обломочные” атачиты, а на глубине, внутри интрузии – “обломочные” порфириды.

Таким образом, новые данные полученные в результате детального изучения состава, строения флюидного режима порфиритовой интрузии на Магнитогорском месторождении отражают особенности магматизма в Магнитогорской мезозоне на рубеже смены геодинамической обстановки в D₃–C₁. Это период смены островодужного этапа развития на аккреционно-коллизийный (островная дуга–континент ВЕП) с формированием трансформных сдвиго-раздвиговых зон в связи со скольжением литосферных плит. Такой тектоно-геодинамический режим характеризуется значительным разнообразием продуктов мантийного и корового магматизма. Это связывается с деструкцией субдуцирующей океанической плиты, образованием “slab-window” и подъемом горячих астеносферных диапиров к основанию литосферы. Поэтому, магматизм на этом этапе (порфирировая интрузия) имеет как надсубдукционные, так и внутриплитные петро-геохимические характеристики.

Исследования проведены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-05-00576.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровиков А.А., Бульбак Т.А., Борисенко А.С., Рагозин А.Л., Палесский С.В. (2015) Поведение рудных элементов в окисленных хлоридных и карбонатно-хлоридно-сульфатных гетерофазных флюидах Cu-Mo(Au)-порфирировых месторождений (по экспериментальным данным). *Геология и геофизика*. **56**(3), 557-570.
2. Бочарникова Т.Д. (1995) Порфирировая интрузия и гематитовое оруденение (Магнитогорское месторождение). *Ежегодник-1994*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 56-57.
3. Бочарникова Т.Д. (1998) Флюидизаты Магнитогорского месторождения. *Ежегодник-1997*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 66-68.
4. Бочарникова Т.Д., Холоднов В.В. (2000) Характеристика процессов флюидно-магматического взаимодействия в субвулканических породах Магнитогорского скарново-магнетитового месторождения. *Ежегодник-1999*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 219-222.

5. Бочарникова Т.Д., Холоднов В.В., Шагалов Е.С. (2014) О природе внутриинтрузивных «обломочных пород» в составе подрудной порфиритовой интрузии Магнитогорского месторождения *Ежегодник-2013*. Тр. ИГГ УрО РАН. (161), 290-296.
6. Бушляков И.Н., Холоднов В.В. (1986) Галогены в петрогенезисе и рудоносности гранитоидов. М.: Наука, 192 с.
7. Валяшко В.М., Урусова М.А. (2010) Гетерогенизация сверхкритических флюидов и невариантные критические равновесия в тройных смесях с одним летучим (на примере водно-солевых систем). *Сверхкритические флюиды: теория и практика*. (2), 28-44.
8. Говорова А.В. (1963) О явлениях дифференциации в порфиритах лежащего бока железорудного месторождения горы Магнитной. *Магматизм, метаморфизм, металлогения Урала. Тр. 1-го Уральского петрограф. совещания*. Свердловск: УФАН СССР, 299-304.
9. Говорова А.В., Червяковский Г.Ф. (1965) О природе атакита. *Изв. АН СССР. Сер. геол.* (12), 42-47.
10. Голубева И.И. (1997) Флюидизаты – как особый класс магматических образований. *Новые идеи в науках о Земле*. М.: МГРИ, 100.
11. Голубева И.И. (2003) Магматогенные флюидизатно-эксплозивные образования Севера Урала. Екатеринбург: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 137 с.
12. Горожанин В.М. (1998) Первичный изотопный состав стронция в магматических комплексах Южного Урала. *Магматизм и геодинамика*. Екатеринбург: УрО РАН, 98-108.
13. Заварицкий А.Н. (1927) Гора Магнитная и ее месторождения железных руд. Л.: Геолком. *Тр. Геолкома*, **122**. В. 1. Ч. 3, 415-695.
14. Иванов К.С. (1998) Основные черты геологической истории (1.6–0.2 млрд лет) и строение Урала. Дис. ... д-ра геол.-мин. наук в форме науч. докл. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 252 с.
15. Маракушев А.А., Безмен Н.И. (1983) Эволюция метеоритного вещества планет и магматических серий. М., Наука, 184 с.
16. Маракушев А.А., Безмен Н.И. (1992) Минералогическо-петрографические критерии рудоносности изверженных пород. М.: Недра, 315 с.
17. Маслов В.А., Артюшкова О.В. (2010) Стратиграфия и корреляция девонских отложений Магнитогорской мегазоны Южного Урала. Уфа: Уфимский НЦ РАН, 287 с.
18. Морозевич И.А. (1901) Гора Магнитная и ее ближайшие окрестности. *Тр. Геол. ин-та*. **18**(1).
19. Нечкин Г.С., Семенов И.В., Бочарникова Т.Д., Гареева А.А., Ронкин Ю.А., Лепихина О.П. (1989) О взаимосвязи и природе атакитов, порфирировых базальтов и оруденения на Магнитогорском месторождении. *Ежегодник-1988*. Свердловск: ИГиГ УрО АН СССР, 39-45.
20. Павлов А.Л. (1983) Генезис магматических магнетитовых месторождений. Новосибирск: Наука, 203 с.
21. Павлов А.Л., Дымкин А.М. (1979) Термодинамика процессов ферритизации в силикатных расплавах и проблемы рудообразования. Новосибирск: Наука, 89 с.
22. Пучков В.Н. (2010) Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: Даурия, 280 с.
23. Реддер Э. (1983) Ликвация силикатных магм. *Эволюция изверженных пород*. М.: Мир, 24-66.
24. Ронкин Ю.Л. (1989) Изотопы стронция – индикаторы эволюции магматизма Урала. *Ежегодник-1988*. Свердловск: ИГГ УНЦ АН СССР, 107-109.
25. Ронкин Ю.Л., Семенов И.В., Лепихина О.П., Попова О.Ю. (2006) Интрузивы Магнитогорской раннекаменноугольной рифтогенной структуры: Sr-Nd изотопные ограничения. *Ежегодник-2005*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 314-318.
26. Рябов В.В. (1999) Флюидный режим траппового магматизма и рудообразования (петрологический аспект). *Геология и геофизика*. **40**(10), 1457-1473.
27. Салихов Д.Н., Мосейчук В.М., Холоднов В.В., Рахимов И.Р. (2014) Каменноугольный вулканоинтрузивный магматизм Магнитогорско-Богдановского грабена в свете новых геолого-геохимических данных. *Литосфера*. (5). 33-56.
28. Салихов Д.Н., Яркова А.В., Салихова Р.Н., Мосейчук В.М. (1987) Вулканизм позднего девона Магнитогорского мегасинклинория (геология, петрохимия, геохимия). Уфа: БФАН СССР, 34 с.
29. Семенов И.В., Нечкин Г.С., Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П. (1990) **Rb-Sr изохронное датирование** образования подрудных вулканитов Магнитогорского железорудного месторождения. *Ежегодник-1989*. Свердловск: ИГГ УрО АН СССР, 69-72.
30. Серавкин И.Б. (2010) Металлогения Южного Урала и Центрального Казахстана. Уфа: "Гилем", 281 с.
31. Ханчук А.И., Мартынов Ю.А. (2011) Тектоника и магматизм границ скольжения океанических и континентальных литосферных плит. *Геологич. процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосф. плит*. Владивосток: Дальнаука, 45-49.
32. Холоднов В.В., Бушляков И.Н. (2002) Галогены в эндогенном рудообразовании. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 391 с.
33. Холоднов В.В., Петров Г.А., Коновалова Е.В. (2013) Скарново-магнетитовые месторождения Урала: возрастная и геодинамическая типизация, флюидный режим, магматические источники. *Процессы рудообразования и прикладная геохимия*. М.: ИМГРЭ, 94-109.
34. Холоднов В.В., Шагалов Е.С., Бочарникова Т.Д., Коновалова Е.В. (2015). Состав и условия формирования Ti-Fe-V оруденения в двупироксеновом габбро Медведевского месторождения (Ю. Урал): Часть I. *Литосфера*. (6), 69-82.
35. Ферштатер Г.Б. (1966) Магнитогорская габбро-гранитная интрузия. Свердловск: УФАН СССР, 144 с.
36. Ферштатер Г.Б. (2013) Палеозойский интрузивный магматизм Среднего и Южного Урала. Екатеринбург: УрО РАН ИГиГ, 364 с.
37. Ферштатер Г.Б., Холоднов В.В., Кременецкий А.А., Краснобаев А.А., Бородина Н.С., Зинькова Е.А., Прибавкин С.В. (2010) Золотоносные габбро-тоналит-гранодиорит-гранитные массивы Урала: возраст, геохимия, особенности магматической и рудной эволюции. *Геология рудных месторождений*. **52**(1), 65-84.
38. Фролова Т.И., Бурикова И.А. (1977) Геосинклинальный вулканизм (на примере восточного склона Южного Урала). М.: МГУ, 266 с.

39. Язева Р.Г., Бочкарев В.В. (1998) Геология и геодинамика Южного Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 204 с.
40. Boudreau A.E., Mc Callum L.S. (1989) Investigation of the Stillwater Complex: Part V. Apatites as indicators of evolving fluid composition. *Contrib. Miner. Petrol.* **102**(2), 138-153.
41. Sun S.S. (1982) Chemical composition and origin of the Earth's primitive mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **46**, 179-192.
42. Sun S.S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In *Magmatism in the Ocean Basins* (Eds. A.D. Saunders and M.J. Norry). Geological Society, London, Spec. Publ. **42**, 313-345.

Composition, structure and fluid regime of differentiated porphyritic intrusion Magnitogorsk iron-ore deposit (Southern Urals)

T. D. Bocharnikova, V. V. Holodnov, E. S. Shagalov, E. V. Konovalova

Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS

Case study of the differentiated subvolcanic porphyritic intrusion underlying Magnitogorsk skarn-magnetite deposit revealed regular relations between petrochemistry features of the rocks and composition of halogens (Cl and F) in the accessory apatite. During the process of intrusion formation in terms of general trend of differentiation from the pyroxene-porphyrites its base to atachites (trachyandesites, phonotephrites) its upper part, several autonomous fluid-magmatic systems (FMS), which differ in major and trace elements distribution as well as halogen composition in apatites, are formed. In the uppermost part of the atachite section, mostly saturated by alkalis and volatile components, through a further fluid-magmatic stratification were formed two atachite strata: sodium, enriched in Na, Ca, Sr, and with a higher Cl content in apatite and potassium "ore-bearing" located at a higher hypsometric level and enriched in K, Rb, Fe, V, Ti, P, with a higher content of F in apatite. Formation of subvolcanic intrusion was accompanied by repeated occurrences of explosive phenomena. These data indicate the features of magmatism in Magnitogorsk megazone in D₃-C₁, at the change the island-arc stage by accretionary-collision (island arc-continent) one.

Keywords: *Magnitogorsk skarn-magnetite deposits, geochemistry, petrology, fluids, halogens, differentiation, ore-formation, minerals, apatite.*

REFERENCES

- Borovikov A.A., Bul'bak T.A., Borisenko A.S., Ragozin A.L., Palesskij S.V. (2015). The behavior of the ore elements in oxidized chloride and carbonate-chloride-sulfate heterogenic fluids Cu-Mo (Au)-porfirovyh field (from experimental data). *Geol. Geofiz.* **56**(3), 557-570. (In Russian)
- Bocharnikova T.D. (1995) Porphyritic intrusion and hematite mineralization (Magnitogorsk deposit). *Ezhegodnik-1994*. Ekaterinburg: IGG UrO RAN, 56-57. (In Russian)
- Bocharnikova T.D. (1998) Flyuids Magnitogorsk field. *Ezhegodnik-1997*. Ekaterinburg: IGG UrO RAN, 66-68. (In Russian)
- Bocharnikova T.D., Holodnov V.V. (2000) Description process of fluid-magmatic interaction in subvolcanic rocks Magnitogorsk skarn-magnetite deposit. *Ezhegodnik-1999*. Ekaterinburg: IGG UrO RAN, 219-222. (In Russian)
- Bocharnikova T.D., Holodnov V.V., Shagalov E.S. (2014) On the nature intra-intrusion "clastic rocks", as part under-ore porphyritic intrusions Magnitogorsk field. *Ezhegodnik-2013*. Trudy IGG UrO RAN. (161), 290-296. (In Russian)
- Bushljakov I.N., Holodnov V.V. (1986) *Galogeny v petrogenezise i rudosnost' granitoidov* [Halogens in the petrogenesis and ore-bearing of granitoids]. Moscow: Nauka Publ., 192 p. (In Russian)
- Valjashko V.M., Urusova M.A. (2010) Heterogenisation supercritical fluids and nonvariant critical equilibrium in triple mixtures with one volatile (for example, water-salt systems). *Sverkhkriticheskie flyuidy: teorija i praktika*. (2) Moscow: GEOKHI. Publ., 28-44. (In Russian)
- Govorova A.V. (1963) About differentiation phenomena in porphyrites from footwall iron ore deposit Magnetic Mount. *Magmatizm, metamorfizm, metallogeniya Urala. Trudy I Ural'skogo petrograficheskogo soveshchaniya*. Sverdlovsk: UF Akad. Nauk SSSR, 299-304. (In Russian)
- Govorova A.V., Chervjakovskij G.F. (1965). On the nature of atachit. *Izv. Akad. Nauk SSSR. Ser. Geol.* (12), 42-47. (In Russian)
- Golubeva I.I. (1997) Flyuidized rocks as a special class of magmatic formations. *Novye idei v naukakh o Zemle. Trudy III mezhdunarodnoj konferentsii*. Moscow:

- MGRI Publ., 100. (In Russian)
11. Golubeva I.I. (2003) *Magmatogennye flyuidizatsionno-eksplzivnyye obrazovaniya Severa Urala* [Magmatogenic flyuidized-explosive formation of the Northern Urals]. Ekaterinburg: UrO RAN Publ., 137 p. (In Russian)
 12. Gorozhanin V.M. (1998) Primary strontium isotopic composition in magmatic complexes of the Southern Urals. *Magmatizm i geodinamika*. Ekaterinburg: UrO RAN Publ., 98-108. (In Russian)
 13. Zavaritskij A.N. (1927) Mount Magnitnaja and its iron ore deposits. *Trudy Geolkomu*. 122 Vyp. 1. Ch. 3, 465-695. (In Russian)
 14. Ivanov K.S. (1998) *Osnovnye cherty geologicheskoy istorii (1.6–0.2 mlrd. let) i stroenie Urala* [The main features of geological history (1.6–0.2 Ma) and structure of the Urals]. Diss. ... dokt. geol.-min. nauk v forme nauch. docl. Ekaterinburg: IGG UrO RAN Publ., 252 p. (In Russian)
 15. Marakushev A.A., Bezmen N.I. (1983) *Evoljutsija meteoritnogo veshchestva planet i magmaticheskikh serij* [The evolution of meteoritic matter planets and magmatic series]. Moscow: Nauka Publ., 184 p. (In Russian)
 16. Marakushev A.A., Bezmen N.I. (1992) *Mineralogopetrograficheskie kriterii rudonosnosti izverzhennykh porod* [Mineralogical and petrographic criteria for ore-bearing igneous rocks]. Moscow: Nedra Publ., 315 p. (In Russian)
 17. Maslov V.A., Artyushkova O.V. (2010) *Stratigrafija i korreljatsija devonskikh otlozhenij Magnitogorskoj megazony Juzhnogo Urala* [Stratigraphy and correlation Devonian Magnitogorsk megazone Southern Urals]. Ufa: Ufimskij nauchnyj tsentr RAN Publ., 287 p. (In Russian)
 18. Morozevich I.A. (1901) *Gora Magnitnaja i ee blizhajshie okrestnosti* [Mount Magnitnaja et and its immediate surroundings]. *Trudy Geol. in-ta*. 18(1). (In Russian)
 19. Nechkin G.S., Semenov I.V., Bocharnikova T.D., Garaeva A.A., Ronkin Y.L., Lepikhina O.P. (1989) On the relationship and nature between atachites, porphyry basalts and mineralization at Magnitogorsk field. *Ezhegodnik-1988*. Sverdlovsk: IGG UrO AN SSSR, 39-45. (In Russian)
 20. Pavlov A.L. (1983) *Genezis magmaticheskikh magnetitovykh mestorozhdenij* [The genesis of magmatic magnetite deposits]. Novosibirsk: Nauka Publ., 203 p. (In Russian)
 21. Pavlov A.L., Dymkin A.M. (1979) *Termodinamika protsessov ferritizatsii v silikatnykh rasplavakh i problemy rudoobrazovaniya* [Thermodynamics ferritization processes in silicate melts and problems of ore formation]. Novosibirsk: Nauka Publ., 89 p. (In Russian)
 22. Puchkov V.N. (2010) *Geologija Urala i Priural'ja (aktual'nye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii)* [Geology Urals and Cisuralian (topical issues of stratigraphy tectonics, geodynamics and metallogeny)]. Ufa: Daurija Publ., 280 p. (In Russian)
 23. Redder E. (1983). Segregation of silicate magma. *Evoljutsija izverzhennykh porod*. Moscow: Mir Publ., 24-66. (In Russian)
 24. Ronkin Yu.L. (1989) Isotopes of strontium – indicators of the Urals magmatism evolution. *Ezhegodnik-1988*. Sverdlovsk: IGG UrO AN SSSR, 107-109. (In Russian)
 25. Ronkin Yu.L., Semenov I.V., Lepikhina O.P., Popova O.Yu. (2006) Intrusions Magnitogorsk Early Carboniferous rift structure: Sr-Nd isotopic constraints. *Ezhegodnik-2005*. Ekaterinburg: IGG UrO RAN, 314-318. (In Russian)
 26. Rjabov V.V. (1999) Fluid regime of trap magmatism and mineralization (petrological aspect). *Geol Geofiz.* 40(10), 1457-1473. (In Russian)
 27. Salihov D.N., Mosejchuk V.M., Holodnov V.V., Rahimov I.R. (2014) Carboniferous volcano-intrusive magmatism Magnitogorsk-Bogdanov graben in the light of new geological and geochemical data. *Litosfera*. (5), 33-56. (In Russian)
 28. Salihov D.N., Jarkova A.V., Salihova R.N., Mosejchuk V.M. (1987) *Vulkanizm pozdnego devona Magnitogorskogo megasinclinorija (geologija, petröhimija, geöhimija)* [Late Devonian volcanism of Magnitogorsk megasinclinorium (geology, petrochemistry, geochemistry)]. Ufa: BFAN SSSR Publ., 34 p. (In Russian)
 29. Semenov I.V., Nechkin G.S., Ronkin Yu.L., Lepikhina O.P. (1990) Rb-Sr isochronous dating formation of under-ore volcanic rocks of the Magnitogorsk iron-ore deposit. *Ezhegodnik-1989*. Sverdlovsk: IGG UrO AN SSSR, 69-72. (In Russian)
 30. Seravkin I.B. (2010) *Metallogenija Juzhnogo Urala i Tsentral'nogo Kazakhstana* [Metallogeny of the Southern Urals and Central Kazakhstan]. Ufa: "Gilem" Publ., 281 p. (In Russian)
 31. Hanchuk A.I., Martynov Yu.A. (2011) Tectonics and magmatism sliding borders the oceanic and continental lithosphere plates. *Geologicheskie protsessy v obstanovkakh subdukcii, kollizii i skolzhenija litosfernykh plit*. Vladivostok: Dal'nauka Publ., 45-49. (In Russian)
 32. Holodnov V.V., Bushljakov I.N. (2002) *Galogeny v endogennom rudoobrazovanii* [Halogens in the endogenous ore formation]. Ekaterinburg: IGG UrO RAN Publ., 391 p. (In Russian)
 33. Holodnov V.V., Petrov G.A., Konovalova E.V. (2013). Skarn-magnetite deposits of the Urals: age and geodynamic typisation, fluid regime, magmatic sources. *Protsessy rudoobrazovaniya i prikladnaja geöhimija*. M.: IMGRE Publ., 94-109. (In Russian)
 34. Holodnov V.V., Shagalov E.S., Bocharnikova T.D., Konovalova E.V. (2016). Composition and condition of formation Ti, Fe, V mineralization in pyroxene gabbro Medvedevsky deposit (South Urals). P. I: The role of the regime of volatiles (water and halogens). *Litosfera*. (2), 48-69. (In Russian)
 35. Fershtater G.B. (1966) *Magnitogorskaja gabbro-granitnaja intruzija* [Magnitogorsk gabbro-granite intrusion]. Sverdlovsk: UFAN SSSR Publ., 144 p. (In Russian)
 36. Fershtater G.B. (2013) *Paleozojskij intruzivnyj magmatizm Srednego i Juzhnogo Urala* [Paleozoic intrusive magmatism of Middle and Southern Urals]. Ekaterinburg: IGG UrO RAN Publ., 364 p. (In Russian)
 37. Fershtater G.B., Holodnov V.V., Kremenetskij A.A., Krasnobaev A.A., Borodina N.S., Zin'kova E.A., Pribavkin S.V. (2010). Gold-bearing gabbro-tonalite-

- granodiorite-granite massifs of the Urals: age, geochemistry, especially magmatic and ore evolution. *Geol. Rudn. Mestorozhd.* **52**(1), 65-84. (In Russian)
38. Frolova T.I., Burikova I.A. (1977) *Geosynclinal'nyj vulkanizm (na primere vostochnogo sclona Yuzhnogo Urala)* [Geosynclinal volcanism (the example of the eastern slope of the Southern Urals)]. Moscow: Moscow St. Univ. Publ., 266 p. (In Russian)
39. Jazeva R.G., Bochkarev V.V. (1998) *Geologija i geodinamika Yuzhnogo Urala* [Geology and geodynamics of the Southern Urals]. Ekaterinburg: UrO RAN Publ., 204 p. (In Russian)
40. Boudreau A.E., Mc Callum L.S. (1989) Investigation of the Stillwater Complex: Part V. Apatites as indicators of evolving fluid composition. *Contrib. Miner. Petrol.* **102**(2), 138-153.
41. Sun S.S. (1982) Chemical composition and origin of the Earth's primitive mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **46**, 179-192.
42. Sun S.S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Magmatism in the Ocean Basins*. (Eds. A.D. Saunders and M.J. Norry). Geol. Soc. London, Spec. Publ. **42**, 313-345.