

## ПЕТРОЛОГИЯ, ВУЛКАНОЛОГИЯ

УДК 552.332(470.1)

**Обобщенный опыт изучения и диагностики  
конвергентных пород на примере  
карбонатизированных флюидоэксплозивных  
ультрамафитов дайкового комплекса  
Среднего Тимана****И.И. Голубева, А.А. Шуйский, В.Н. Филиппов, И.Н. Бурцев**

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

167982, Сыктывкар, ул. Первомайская, 54. E-mail: iigolybeva2@yandex.ru

*(Статья поступила в редакцию 11 декабря 2020 г.)*

На Среднем Тимане выделены дайковые флюидоэксплозивные породы с конвергентными свойствами за счет сочетания эксплозивных и метасоматических процессов. Изучение петрографических особенностей пород выявило их эксплозивную природу, а исследование химического состава породообразующих минералов установило источник мантийного материала и парагенетическую связь с карбонатитовым магматизмом. Флюидоэксплозивные породы дайкового комплекса связаны с фенитизацией вмещающей толщи с последующей ее дезинтеграцией и заполнением трещин твердогазовым материалом смешанного мантийно-корового состава. На последнем этапе становления флюидоэксплозивных пород за счет карбонатизации проявляются редкометалльно-редкоземельная и сульфидная минерализации.

Ключевые слова: *карбонатиты, дайки, флюид, эксплозия, редкоземельно-редкометалльная минерализация, Средний Тиман.*

DOI: 10.17072/psu.geol.20.1.11

**Введение**

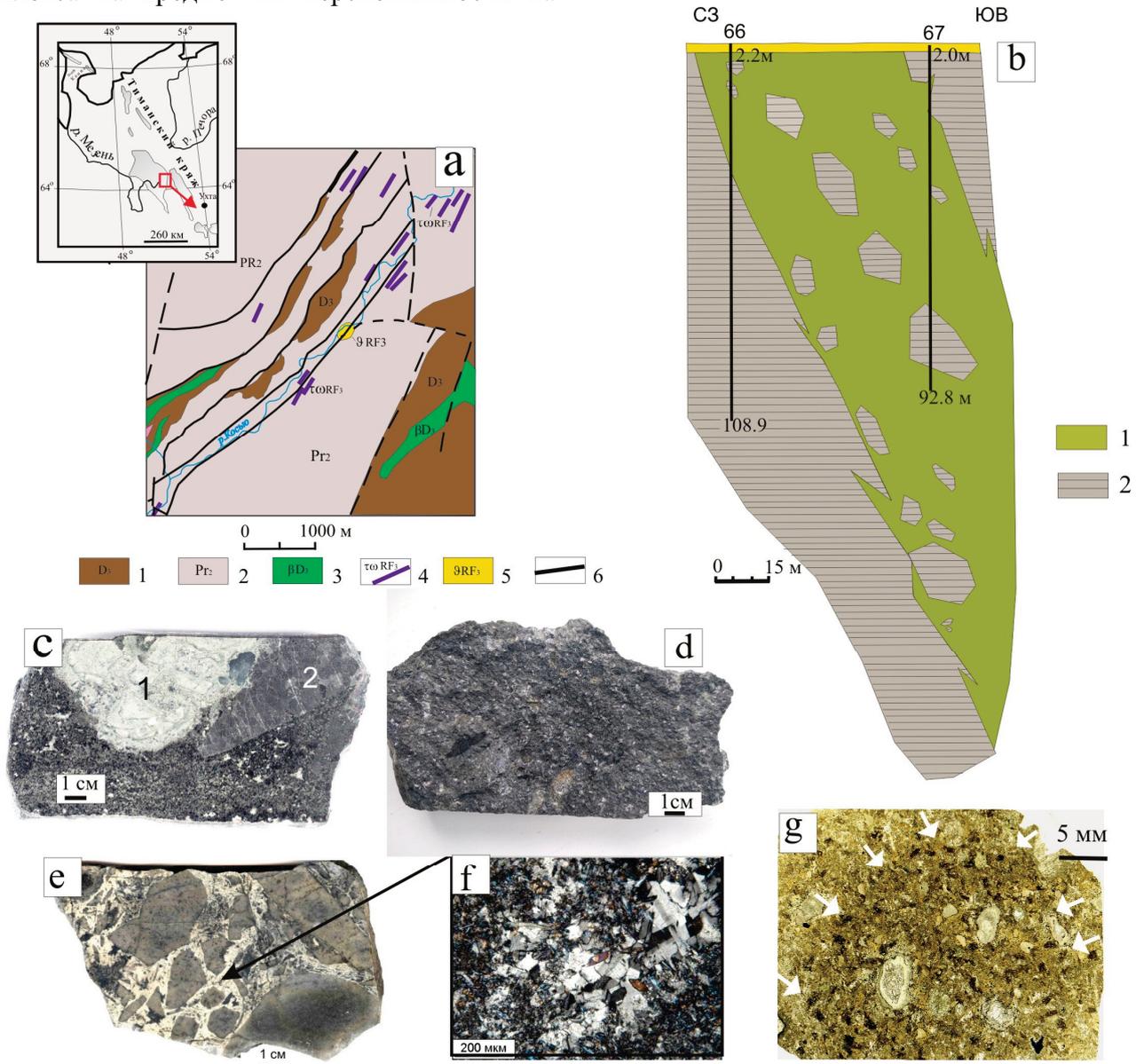
В статье рассматриваются гипабиссальные породы Среднего Тимана, объединенные в четлаский комплекс щелочных пикритов (Государственная геологическая карта..., 2015). На самом деле типизация данных пород не закончена и имеет сложный путь, связанный с отсутствием коренных выходов и высокой степенью метасоматических процессов. Породы имеют ярко выраженные конвергентные свойства, обусловленные обломочным обликом многочисленных ксенокристаллов, ксеногенным материалом мантийного и корового происхождения, а также обильным проявлением пойкилобластеза флогопита.

Данные породы впервые на Среднем Тимане были выявлены В.А. Чумаковой в

1941 г. в коренных обнажениях на р. Косью в виде обохренных жилок с мощностью нескольких сантиметров, сложенных оливином, пироксеном, амфиболом, плагиоклазом, карбонатом, и описаны как лампрофиры (Черный, 1972). Надо отметить, что введенный в 1879 г. термин лампрофир до сих пор имеет расплывчатое определение, без особых петрохимических и петрографических характеристик. Исследователь магматизма Тимана Ю.И. Ивенсен (1964) предположил, что обнаруженные сильно измененные породы в поверхностных условиях относятся к лампрофирам альнеит-польценитового и шонкинит-бекенкинитового рядов. Однако в дальнейшем породы свежего облика, вскрытые скважинами, он однозначно определил как биотитовые пикриты. М.И. Осадчук (1964), обобщая материалы предыдущих ис-

следователей, выделил пикритовые порфиры, лампрофиры и эруптивные брекчии камптонит – мончикитового ряда. В. Г. Черный с соавторами (1972) анализируя собственные материалы, полученные в результате исследования пород дайкового комплекса на предмет их перспективности на

алмазонасность, выделяет на Среднем Тимане щелочно-ультраосновную формацию, включающую карбонатиты, биотитовые пикриты, лампрофиры с взрывными фациями, эксплозивные брекчии с обломками ультраосновных пород.



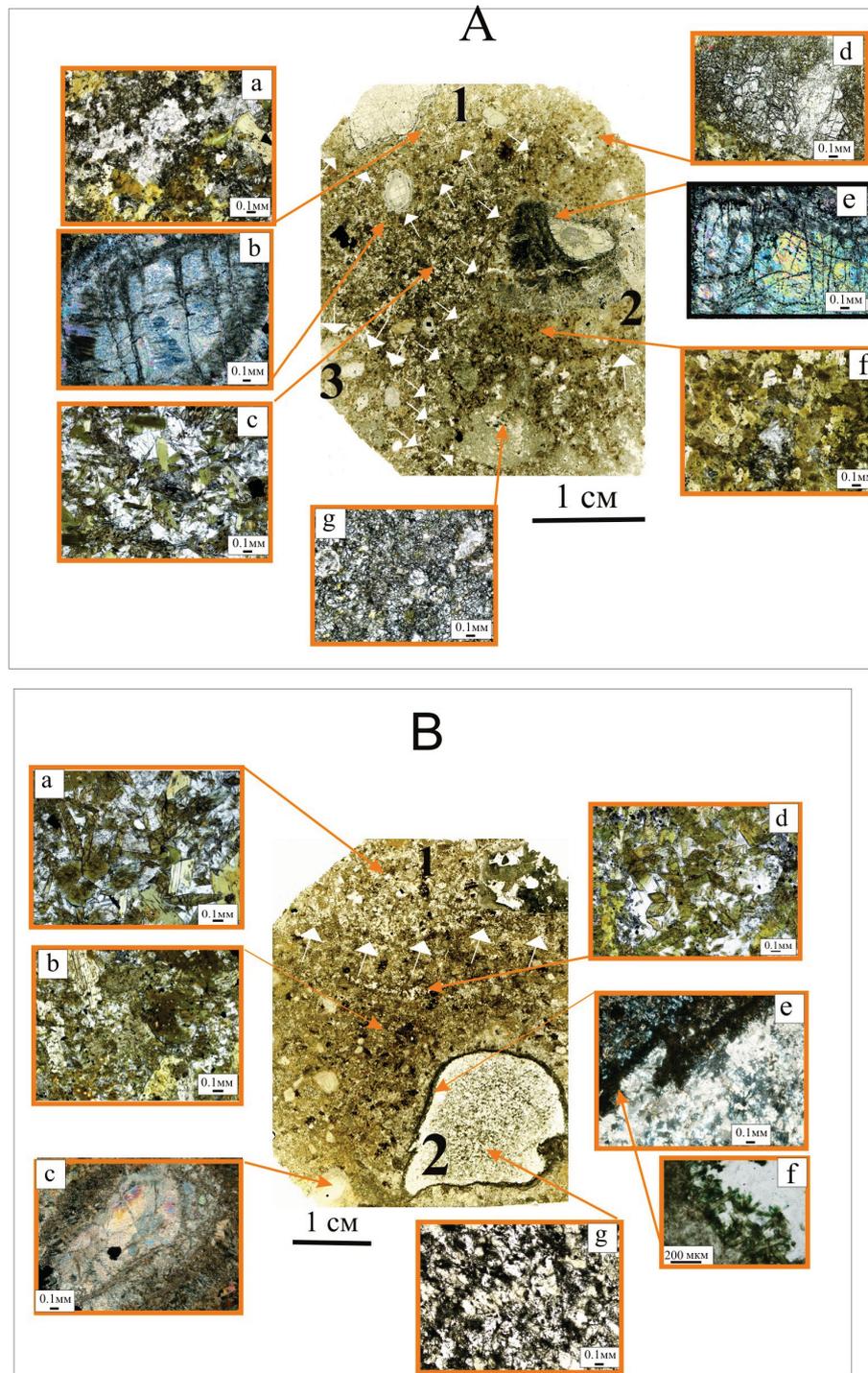
**Рис. 1.** Флюидоэксплозивные породы дайкового комплекса Среднего Урала: а – фрагмент государственной геологической карты масштаба 1:200 000 (Пачуковский и др., 1985): 1 – песчаники, алевролиты, аргиллиты, 2 – кварцитопесчаники, алевролиты, сланцы, 3 – базальты, долериты, 4 – флюидоэксплозивные породы дайкового комплекса, 5 – карбонатиты, 6 – разломы; б – разрез дайки флюидоэксплозивных пород по скважинам № 66 – № 67 (Дубина, 1983): 1 – флюидоэксплозивные породы, 2 – терригенные отложения протерозоя; с – флюидоэксплозивная брекчия с ксенолитами фенитизированных докембрийских песчаников (1) и горнблендитов (2); д – флюидоэксплозивная брекчия с массивной текстурой; е – дезинтегрированный и альбитизированный ксенолит вмещающего кварцевого песчаника; ф – фрагмент альбитовой жилки в ксенолите вмещающего кварцевого песчаника; г – флогопитизированный обломок в флогопитизированном матрице флюидоэксплозивной брекчии

При этом производной для всех пород выделенной формации послужила щелочно-ультраосновная магма. Неутрачивающий интерес к описываемым образованиям, обусловленный перспективами алмазности и редкометалльно-редкоземельной рудоносности региона, побуждает к новым исследованиям вещественного состава магматитов данного комплекса. В научных публикациях в последнее время описываемые породы трактуются в основном как меланократовые щелочные лампрофиры, относимые к различным семействам (Махлаев и др., 2003; Макеев и др., 2008; Недоскова и др., 2011). На сегодняшний день описываемые флюидо-эксплозивные ультрамафиты дайкового комплекса в легенде Государственной геологической карты Российской Федерации третьего поколения (масштаб: 1 000 000) (2015) выделены как четласский пикритовый комплекс рифейского возраста.

Причина такого разнородного определения пород или, как выразился В.И. Степаненко, «...неправдоподобного набора пород для такого небольшого магматического комплекса...» (Степаненко, 2015, с. 9) заключается в отсутствии коренных обнажений, недостаточной изученности kernого материала и неправильном подходе к исследованию. Полагаясь на собственный и чужой опыт в изучении флюидоэксплозивных образований (Голубева, 2003), учитывая результаты многолетних исследований Тимана Ухтинской геолого-разведочной экспедиции, а также пользуясь методическими рекомендациями ВСЕГЕИ по выявлению эндогенных брекчиевых пород (Шарпенюк и др., 2005), мы пришли к выводу, что породы четласского дайкового комплекса представляют собой карбонатизированные флюидоэксплозивные породы, образованные за счет флюидных дериватов карбонатитовой расплава, послуживших транспортировщиком эксплозивного обломочного мантийного материала и средой метасоматического минералообразования (Голубева и др., 2019). Карбонатитовое тело и парагенетически связанные с ним флюидоэксплозивные ультрамафиты дайкового комплекса приурочены к серии разрывов трещинного типа среди терригенно-карбонатных пород четласской и быстринской серий среднего и верхнего рифея (рис. 1, а).

К 90-м гг. было выявлено около 50 дайковых полей, насчитывающих тысячи даек. Дайковые тела находятся в зонах разломов и не имеют четких контактов. Мощность флюидоэксплозивных даек варьирует от десятков сантиметров до десятков метров в раздувах, их протяженность достигает 3 км. Отмечаются многочисленные апофизы и прожилки во вмещающих породах, образующие сложные штокверковые тела. В породах отмечаются округленные обломки мантийных пород (пироксениты, реже горнблендиты и перидотиты) с размерами до 10 см (рис. 1, с). В единичных случаях их концентрация достигает 60%. В меньших количествах встречаются ксенолиты вмещающих пород, представленные кварцевыми песчаниками и их фенитизированными аналогами (рис.1, е, f). За счет пропитывания карбонатно-щелочными флюидами в прифронтальной зоне флюидоэксплозивного твердогазового потока образуются альбит-карбонатные фениты, содержащие эгирин. Впоследствии фенитизированная толща докембрийских кварцевых песчаников дезинтегрируется и в виде отдельных обломков смешивается с поступающим мантийным материалом. В краевых зонах фенитовых обломков, контактирующих с матриксом, наблюдаются процессы перекристаллизации с укрупнением минералов кальцита и эгирина (рис. 2, (В) g,e). Практически во всех случаях обломки пород имеют округленные «окатанные» формы, приобретенные во время их переноса в текучем флюидном потоке.

Помимо этого, в дайках диагностируются оторженцы вмещающей толщи с ненарушенными элементами залегания, что указывает на отсутствие их перемещения и спокойное истечение флюидизированного материала (рис. 1, b). Ксенокристаллы, представленные оливином, пироксеном и хромшпинелидом, погружены в связующую массу, сложенную метасоматическими минералами с резко варьирующим процентным составом: кальцитом (от 0.5 до 10%), роговой обманкой (0 до 50%), пироксеном (от 0 до 70%), флогопитом (от 0 до 70%). В малых количествах диагностируются эпидот, хлорит, фторсодержащий апатит (содержание фтора 1.42 – 3.25 мас. %), цериевый монацит, марганцевый ильменит, сульфиды, магнетит.



**Рис. 2.** А; В – структурные особенности флюидоэксплозивных пород дайкового комплекса. Отсканированные петрографические шлифы (А; В). А: а – флогопит-кальцитовый агрегат; б – оталькованный кристаллокласт оливина в матрице; с – амфибол-кальцитовый агрегат цементирующей массы; д – дезинтегрированный пироксен, замещенный хлоритом; е – фрагмент оталькованного кристаллокласта оливина; ф – мелкочешуйчатый агрегат флогопита в обломке № 2; г – раздробленный и хлоритизированный пироксен. В: а – амфибол-кальцитовый агрегат; б – биотит-амфибол-кальцитовый агрегат вмещающей массы; с – оталькованный кристаллокласт оливина с криволинейными трещинами отщепления; д – перекристаллизованная роговая обманка с укрупнением кристаллов в кальцитовом прожилке; е – перекристаллизованный эгирин с укрупнением кристаллов в контактовой зоне фенитизированного ксенолита кварцевого песчаника; ф – фрагмент перекристаллизованного эгиринового агрегата в контактовой зоне; г – тонкоигольчатый эгирин в ксенолите кварцевого песчаника

По существу, рассматриваемые флюидоэксплозивные породы представляют собой своеобразный микс обломочного материала мантийно-корового происхождения с метасоматическими минералами матрикса.

### Методика и материалы исследований

Микроскопическое изучение пород проводилось в лаборатории петрографии ИГ Коми НЦ УрО РАН (оптический микроскоп OLYMPUS BX 51). Элементный состав определялся методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре ELAN 9000 (PerkinElmer Instruments) (ИГиГ УрО РАН, г. Екатеринбург). Состав минералов определялся методом микрозондового анализа на сканирующих электронных микроскопах JSM-6400 JEOL и VEGA3 TESCAN (ИГ Коми НЦ УрО РАН). Материалом для нашего исследования послужила сохранившаяся часть коллекции петрографических шлифов сотрудника Ухтинской геолого-разведочной экспедиции В.Г. Черного, сделанных из керна более сорока скважин. Также были представлены фрагменты керна скважины № 55 глубиной 173 м, находившиеся в лесной зоне.

### Петрографическое описание пород

На макроуровне, исключая участки, насыщенные обломками пород мантийного и корового происхождения, порода имеет плотное сложение и черный цвет. На фоне черного цвета хорошо распознаются блестящие пластинки флогопита и округлые ксенокристаллы замещенного вторичными минералами темно-зеленого оливина (рис. 1, d). Именно такие, предположительно однородного состава, участки пород обычно отбираются для петрохимических исследований. На самом деле внешняя однородность породы имеет обманчивое впечатление. Изучение петрографических шлифов обнаруживает реликтовое брекчиевое строение, завуалированное метасоматической минерализацией. Например, в отсканированном петрографическом шлифе (рис. 1, g) прослеживается едва заметный контур (на рисунке указано белыми стрелками) округленного реликтового обломка, выделяющегося более темной окраской за счет преобладания флогопита

относительно такого в матриксе. Поэтому можно ожидать, что при дальнейших метасоматических преобразованиях границы обломков исчезнут, порода потеряет первичное брекчиевое строение, приобретая при этом пятнистую неоднородную текстуру. Процесс затушевывания границ обломочного материала за счет вторичных изменений объясняет отмеченные всеми исследователями резкие вариации состава минералов и их количеств в цементирующей массе. Данное заключение хорошо демонстрирует микрофотография матрикса флюидоэксплозивной породы (рис. 4, а), где неоднородность связующей массы выражена в контакте мономинеральных «пропитанных» кальцитом обособлений пироксенового и флогопитового составов. В таком случае становится непонятно, в какой роли представлен тот или иной минеральный агрегат – или в качестве цементирующего материала, или обломка. Данное явление, когда сливаются границы цементирующего материала и ксенолита, характерно для флюидоэксплозивных образований (Голубева, 2003). В другом случае в отсканированном шлифе, сделанном из керна скважины 55, хорошо диагностируются три различных обломка, погруженных в агрегат кальцита и роговой обманки (рис. 2, А). Причем обломок под номером 2 на рис. 2, А в свою очередь также имеет реликтовое брекчиевое строение, обозначенное неоднородным распределением флогопита и кальцита. Структура брекчия в брекчии типична для таких флюидоэксплозивных пород, как кимберлиты, свидетельствует о многофазном эксплозивном магматизме. Округленные обломки пород в данном образце, сложенные с разным процентным отношением минералов кальцит-флогопитового агрегата, погружены в амфибол-кальцитовый матрикс. Данные обломки в свою очередь включают кристаллокласты замещенного тальком оливина (рис. 2, А (b,e)) и дезинтегрированный пироксен (рис 2, А (d, g)), замещаемый хлоритом. В другом срезе породы в виде петрографического шлифа площадью 3 x 3.5 см наблюдается обратная картина, где цементирующим материалом выступает флогопит-кальцитовый агрегат (рис. 2, В (b)), а метасоматизированные ксенолиты в виде округленных обломков сложены в большей степе-

ни роговой обманкой и кальцитом (рис. 2, В (b)). Обломок под номером 1, отмеченный на рис. 2, В белыми стрелками, отличается более светлой окраской за счет повышенного количества кальцита. В цементирующем матриксе наблюдаются ксенокристаллы пироксена и округленный обломок оливина (рис. 2, В (c)) с криволинейными трещинами отщепления. Здесь же в кальцитовом прожилке отмечается перекристаллизация с укрупнением кристаллов роговой обманки (рис. 2, В (d)). В ксенолите фенитизированного кварцевого песчаника, представленном обломком № 3 на рис. 2, В обнаружены реакционные каймы, сложенные перекристаллизованными крупными кристаллами кальцита и эгирина (рис. 2, В (e,f)). Их появление объясняется длительным термальным контактом обломка с транспортирующим флюидом. Таким образом, порода дайкового комплекса Среднего Тимана, хотя и выглядит в некоторых случаях массивной, на самом деле имеет весьма неоднородное строение с резко варьирующим минеральным составом, полученным в результате метасоматической переработке тонкодисперсной обломочной «трухи» и более крупных обломков мантийного и корового происхождений. За счет метасоматических преобразований исчезают первичные очертания обломков, появляются резко разнородные по минеральному составу участки цементирующего матрикса, включающего в свою очередь более крупные ксенолиты мантии и вмещающей толщи. Во всех случаях в обломках и связывающем их матриксе в виде интерстиций присутствует кальцит. Флюид, дериват карбонатитового расплава-раствора, насыщенный щелочами, углекислотой и водой является не только транспортировщиком обломочного материала, но и служит средой для метасоматического минералообразования.

### Петрогеохимические особенности пород

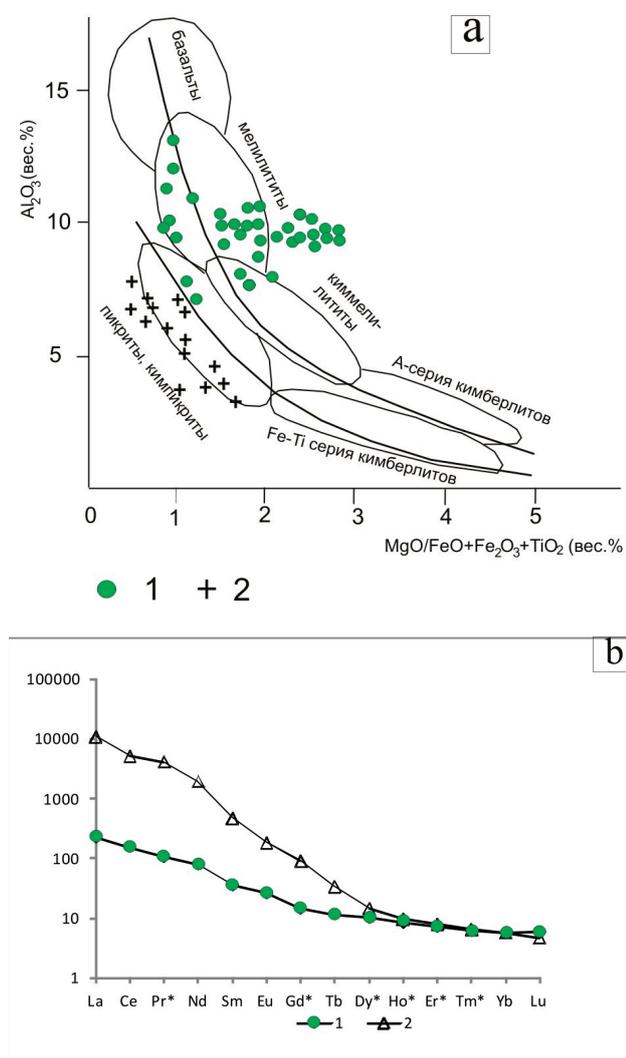
Неоднородный минеральный состав пород отражается на химическом составе, приводящем к противоречивым диагностическим выводам. Петрохимический состав характеризуется колебанием содержания  $\text{SiO}_2$  в пределах 39.0 – 41.1 мас.% и весьма резким перепадом значений суммы щелочей – 2.27 –

7.75 мас.%. Выявлено нехарактерное для пикритов относительно низкое количество  $\text{MgO}$  (11.4 – 18.6 мас.%) и  $\text{TiO}_2$  (0.95 – 1.7 мас.%), а также несвойственные повышенные содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (7.35 – 12.5 мас.%) (Лапин и др., 2004). На диагностических дискриминационных диаграммах описываемые породы индифицируются как мелилититы, как альпикриты и даже как лампроиты Австралии (Голубева и др., 2019). На представленной в данной статье диаграмме  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}/\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$  фигуративные точки химических анализов пород скважины № 55 располагаются не в поле пикритов по причине, как уже отмечалось, повышенного содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а в контурах мелилититов (рис. 3, а). Предложенные петрохимические критерии (Фролов и др., 2004) для конвергентных пород (кимпикритов и альпикритов), связанных с кимберлитовым или карбонатитовым магматизмом, не внесли ясности. Отношения средних содержаний  $\text{MgO}/\sum\text{FeO}$  (2.13),  $\text{MgO}/\text{TiO}_2$  (13.5),  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  (4.7) соответствуют таковым показателям в одном случае кимпикритами, а в другом кимберлитами или альпикритами (Голубева и др., 2019). Среднее содержание  $\text{Cr}$  (977.6 г/т) в дайковых породах Тимана подобно количественным данным по кимберлитам (960.0 г/т), но при этом отмечается низкое количество  $\text{Ni}$  (263.0 г/т). Данные по содержаниям (г/т)  $\text{V}$  (171.0),  $\text{Zr}$  (93.0),  $\text{Nb}$  (78.8), суммы  $\text{TR}$  (276.2),  $\text{Sr}$  (93.0) и  $\text{Ba}$  (1102) наиболее близки кимберлитовым геохимическим характеристикам. Спектры распределения редкоземельных элементов в дайковых флюидоэксплозивных породах и ассоциирующих с ними карбонатитах показывают разнородные магматические источники (рис. 3, б). Карбонатиты Тимана имеют индивидуальные особенности за счет высокого содержания лантаноидной группы редкоземельных элементов ( $\text{La} - 3659$  г/т) (Ковальчук и др., 2013). Отсутствие ассоциирующего с карбонатитовым массивом какого-либо щелочного массива предполагает их субвулканическое становление, что подтверждено и индикаторными элементами (Недосекова и др., 2011). Щелочные комагматы карбонатитов, на основе геофизических данных, возможно, имеют глубокие корни на глубине до 18–35 км от современной по-

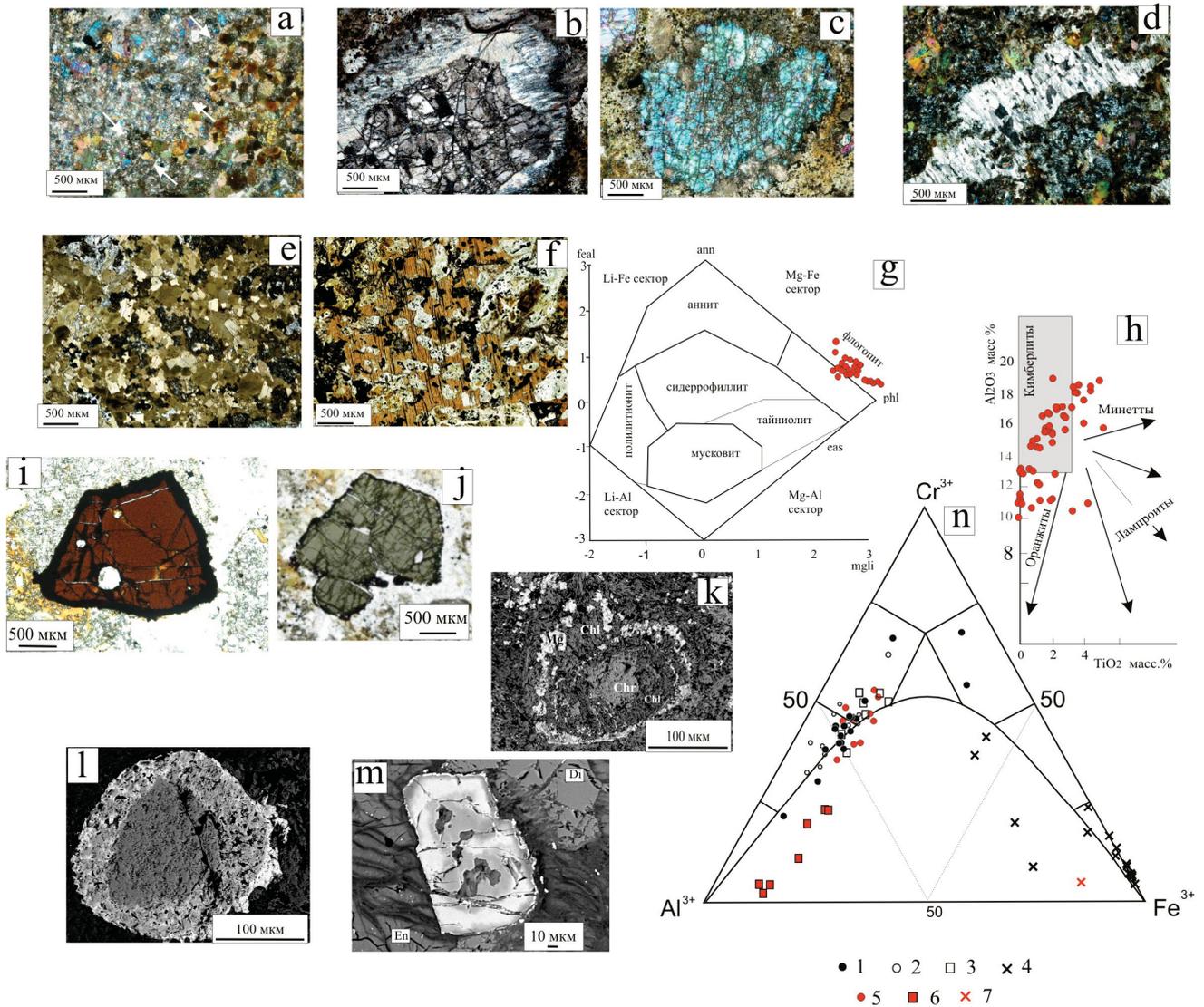
верхности в виде тел предположительно ультраосновного-основного составов (Макеев и др., 2008). Специфический состав элементов-примесей карбонатитов и их количественные значения не удовлетворяют ни одному признаку известных карбонатитовых формаций так же, как и глубоко метасоматически переработанные разности (Расс, 1998). Таким образом, для установления формационной принадлежности флюидоэксплозивных пород дайкового комплекса Среднего Тимана петрогеохимические характеристики не функциональны.

### Характеристика породообразующих минералов

Исследование минерального состава флюидоэксплозивных даек дало хороший результат в выяснении генетической природы дайкового комплекса и установлении источника ксеногенного мантийного материала. Кристаллокласты *оливина* в породе имеют, как правило, округлые очертания с разведенными заливообразными краями с размерностью до 2 см. Их количество, по наблюдению производственных организаций, может достигать 70%, что предопределяет облик кимберлита. Оливин практически всегда замещен до полных псевдоморфоз в разном процентном соотношении вторичными минералами: серпентином, кальцитом, тальком и магнетитом (рис. 4, b). Оливин в сохранившихся участках имеет содержание Fe 79.2 – 91.7% (Довжикова и др., 2018; Макеев и др., 2008), что соответствует в целом температурам их генерации в верхних слоях мантии (1200 – 1300<sup>0</sup>). *Пироксен* как ксеногенный материал менее подвержен вторичным изменениям, поэтому химический состав его был изучен лучше (рис. 3, c). По химическим характеристикам пироксен относится к группе диоксида низкотемпературно – барического происхождения (Довжиков и др., 1985; Довжикова и др., 2018; Макеев и др., 2003; Голубева и др., 2019). Для него типично высокое содержание оксидов железа (в среднем 5.4 мас.%), глинозема (в среднем 6,7 мас. %), кальция (в среднем 21,4 мас.%) и пониженное количество магния (в среднем 14.1 мас.%). В пироксенитовом ксенолите были исследованы диопсид и энстатит на предмет их термодинамических условий образования. С помощью дупироксенового термометра установлена температура равновесия химических составов 954 – 1040<sup>0</sup> (Голубева и др., 2020). В дайковой породе диагностируется низкобарический изумрудного цвета *хромдиопсид* (Cr<sub>2</sub>O, 0.6–1.77 мас. %). Для него установлены характерные низкие содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 5.6 мас. %, Na<sub>2</sub>O до 0.84 мас. % и полное отсутствие K<sub>2</sub>O. Изучение мантийных ксенокристаллов *хромитинелидов* дало существенную дополнительную информацию, так как является одним из главных индикаторных минералов, отражающих эволюцию расплава и становления породы.



**Рис. 3.** Петрохимические характеристики флюидоэксплозивных пород: а – распределение фигуративных точек химических анализов флюидоэксплозивных пород Среднего Тимана (1) и щелочных пикритов Восточной Сибири (2) на диаграмме  $Al_2O_3 - Mg/FeO+Fe_2O_3+TiO_2$ ; б – спектры распределения редкоземельных элементов флюидоэксплозивных пород (1) и карбонатитов (2) Среднего Тимана



**Рис. 4.** Морфология и химические особенности минералов флюидоэксплозивных пород дайкового комплекса: *a* – контакт двух мономинеральных пироксеновых и флогопитовых зон; *b* – зональное замещение кристаллокластов оливина кальцием (центральная зона) и тальком (краевая зона); *c* – резорбированный кристаллокласт диопсида; *d* – кальцитовая метасоматическая жилка; *e* – мелкочешуйчатый флогопит; *f* – пойкилобласт флогопита; *g* – фигуративные точки химических анализов флогопита (скважина №55) на классификационной диаграмме (Mg-Al) – (Fe-Mn+Ti+Al<sup>VI</sup>) (Tishendorf, 2007); *h* – фигуративные точки химического анализа флогопита (скважина № 55) на классификационной диаграмме Митчелла; *i* – кристаллокласт хромшпинелида с реакционной каймой (микрофотография без анализатора); *j* – кристаллокласт железистой шпинели (микрофотография без анализатора); *k* – электронно-микроскопическое изображение кристаллокласта железистой шпинели (Chr), замещаемой хлоритом (Chl) и магнетитом (Mg); *l* – электронно – микроскопическое изображение кристаллокласта хромшпинелида с реакционной каймой; *m* – электронно - микроскопическое изображение зонального кристалла хромшпинелида из пироксенитового ксенолита; *n* – химический состав хромшпинелидов и реакционных каемок из пироксенитового ксенолита и вмещающей массы. Условные обозначения: 1 – хромшпинелиды из скважины № 55, 2 – хромшпинелиды из других скважин (Макеев и др., 2008), 3 – реакционная (кружевная) кайма, 4 – магнетитовая кайма. Химический состав хромшпинелидов из пироксенитового ксенолита (скважина №55): 5 – реликтовый состав, 6 – реакционная кайма, 7 – магнетитовая кайма

Реликтовые участки хромшпинелида (рис. 4, *i*) по химическому составу (в мас. %)  $TiO_2 = 0.0 - 1.51$ ;  $Al_2O_3 = 12.2 - 41.0$ ;  $Cr_2O_3 = 17.42$

–  $51.45$ ;  $FeO + F_2O_3 = 12.55 - 20.29$ ;  $MgO = 12.05 - 20.43$  соответствуют среднехромистым разновидностям – субферриалюмохро-

митам и субферрихромпикотитам. На тройной диаграмме  $Al^{3+} - Cr^{3+} - Fe^{3+}$  отмечается неполный  $Al^{3+} - Cr^{3+}$  мантийный перидотит-пироксенитовый эволюционный тренд, соответствующий пироксенитовому генезису (рис. 4, n). Фигуративные точки составов хромшпинелидов из разных даек расположены в одном поле, что подтверждает их единый генезис и однородность мантии на всем участке проявления дайкового флюидоэксплозивного магматизма. Повышенное содержание  $TiO_2$  (в среднем 0.66 мас. %) свидетельствует о мантийном метаморфизме. В ксенокристаллах хромшпинелида наблюдается реакционная кайма (рис. 4, i; l) с химическим составом, отличающимся от первичного мантийного хромшпинелида повышенным содержанием общего количества железа (19.0 – 37.0 мас. %) и пониженным магнием (2.61 – 12.79 мас. %). Отмечаются в небольших количествах примеси  $MnO$  (0.81 – 1.93 мас. %) и  $ZnO$  в количестве 1.47 мас. %. Появление  $Zn$  в реакционной кайме свидетельствует о гидротермально-метасоматических и гидрогенных процессах, проходивших в уже коровых условиях (Силаев и др., 2010). На последних стадиях становления породы формируется магнетитовая кайма (рис. 3, l) с  $MnO$  (0.87 – 3.48 мас. %) и  $ZnO$  (до 3.48 мас. %). Эволюция химического состава обломочного среднехромистого хромшпинелида в эксплозивных дайках доказывает мантийный источник ксеногенного материала из верхних слоев верхней мантии и отрицает пикритовый генезис так же, как и наличие ксенокристаллов железистой шпинели (рис. 4, j). Шпинель замещается хлоритом и магнетитом (рис. 4, k). Хромшпинелид из пироксенитового ксенолита так же относится к среднехромистым разновидностям (рис. 4, n). Минерал, защищенный от воздействия флюидов, имеет хорошо образованные грани без кружевных вторичных оболочек. У минерала обнаружены так называемые обратные или «шпинелевые» зональности с замещением  $Cr^{3+} \rightarrow Al^{3+}$  (рис. 4, m). Подобная зональность наблюдалась в хромшпинелидах в метеоритах, базальтах срединно-океанических хребтов, ультрамафических комплексах Китая, Египта, Австралии и др. (Ahmed, 2008; Yang Bai, 2018). Визуально скрытая обратная (шпинелевая) зональность

выявлена и в высокохромистых хромшпинелидах в гарцбургитах ультрамафического массива Рай-Из на Полярном Урале (Вахрушева и др., 2011), а также в дунитах Нижнемамонского массива в Воронежской кристаллической структуре (Плаксенко, 1989). На основе геологических предпосылок и химического состава, ассоциирующих с хромшпинелидами с подобной зональностью породообразующих силикатов, исследователи склоняются к тому, что зональность образуется за счет термального метаморфизма. В нашем случае подобная зональность предполагает термальное воздействие флюидным потоком на породы верхней мантии с их последующей дезинтеграцией на отдельные фрагменты минералов и пород. Транспортирующий флюиды обломочный материал вызывает коррозию хромшпинелидов с образованием кружевных оболочек. В ксенолите по хромит-оливиновому геотермометру получена температура кристаллизации хромшпинелида  $1180^\circ C$  (Голубева и др., 2020). На основе данных (приведенных выше) двупироксенового геотермометра –  $954\text{--}1040^\circ C$  с учетом погрешности  $50^\circ C$  получена температура кристаллизации пироксенитового ксенолита – около  $1000^\circ C$ . Таким образом, химические особенности ксенокристаллов и породообразующих минералов ксенолитов мантийных пород: оливина, диопсида, хромдиопсида и хромшпинелида свидетельствуют об едином малоглубинном мантийном происхождении. Метасоматический кальцит в флюидоэксплозивных породах обнаруживает несколько генераций. Первая генерация связана с процессом фенитизации, предшествующем внедрению флюидизированной эксплозивной обломочной массы. Вторая генерация представлена основным цементирующим материалом эксплозивных пород, развивающимся в виде интерстиций. На последних стадиях формирования эксплозивных даек кальцит с примесью  $SrO$  до 9.43 мас. % в ассоциации с альбитом образует метасоматические жилки (рис. 4, d) или миндалевидные обособления. В них обнаружены редкоземельные карбонаты группы *анкелита*, что стало ключевым моментом для установления парагенетической связи флюидоэксплозивных пород дайкового комплекса с карбонатитовым магматизмом (Голубева и

др., 2018). В этих же прожилках диагностированы минералы тория – торогуммит, торанит, торит, фтористый апатит, алланит, цериевый монацит, марганцевый ильменит (MnO до 8.9 мас. %) и сульфиды: миллерит, пентландит, сфалерит, молибденит, халькопирит (Голубева и др., 2018). Редкометалльно-редкоземельная минерализация в кальцит-альбитовых прожилках, как и в карбонатитах Тимана, появляется на стадии низкотемпературного метасоматоза (Костюхин и др., 1987). *Флогопит является самым распространенным* в породе метасоматическим минералом, его количество в верхних прикровельных участках даек может достигать 90% (рис. 4, г). В этом случае порода представлена практически мономинеральным слюдитом. В породах отмечается до пяти генераций флогопита (Костюхин и др., 1987). На корреляционном графике Митчелла фигуративные точки химического состава флогопита располагаются в поле кимберлитов (рис. 4, h). Менее распространенный метасоматический минерал амфибол представлен паргаситом и амфиболом тремолит-актинолитовой группы (Макеев и др., 2003; Довжикова и др., 2018; Голубева и др., 2019).

### Заключение

Таким образом, основным методом для изучения и диагностирования конвергентных пород, представленных в данном случае дайковым комплексом карбонатизированных флюидоэксплозивных пород Тимана, является петрографический. Парагенетическая связь с карбонатитовым магматизмом была установлена с помощью изучения химических особенностей минералов. Петрографическое изучение пород показало взрывное происхождение и причину минеральной пестроты цементирующего матрикса. Неоднородность матрикса заключается в полном замещении метасоматическими минералами (флогопитом, кальцитом, пироксеном и амфиболом) мелкодисперсного разнородного по происхождению обломочного материала. В результате матрикс приобретает новый качественный состав с контрастными вариациями метасоматических породообразующих минералов. При этом более крупные обломки в свою очередь также имеют реликтовое брекчиевое строение, обязанное многократ-

ному внедрению текучего твердогазового материала. Химические особенности мантийных минералов, представленных в качестве ксенокристаллов и породообразующих минералов мантийных ксенолитов: оливина, пироксена и хромшпинелида, позволило восстановить термодинамические условия их образования в мантии. Выяснилось, что источник мантийного компонента флюидоэксплозивных пород был единым и представлен в основном верхними слоями мантии. Не исключено, что газовые флюидные потоки могли захватить и более глубокий материал. Обнаружение в породах дайкового комплекса метасоматического кальцита с примесью Sr и редкоземельно-редкометалльной минерализацией подобной в пространственно ассоциирующем карбонатитовом теле, установило с последним парагенетическую связь. Флюидоэксплозивные породы дайкового комплекса Среднего Тимана имеют продолжительное многоэтапное становление, связанное с фенитизацией вмещающей толщи с последующей ее дезинтеграцией и заполнением трещин твердогазовым материалом смешанного мантийно-корового происхождения. На последнем этапе становления флюидоэксплозивных пород за счет карбонатизации проявляется сульфидная и редкометалльно-редкоземельная минерализация.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Республики Коми в рамках научного проекта № 20-45-110010*

### Библиографический список

- Вахрушева Н. В., Ширяев А. Е., Степанов А. Е., Богданова А. Р. Петрология и хромитосность ультраосновного массива Рай-Из. Полярный Урал. Екатеринбург. 2011. 265 с.
- Голубева И. И. Магматогенные флюидизационно-эксплозивные образования Севера Урала / УрО РАН. Екатеринбург. 2003. 131 с.
- Голубева И. И. Бурцев И. И. Проблема типизации щелочных ультрамафитов дайкового комплекса Среднего Тимана // Петрография магматических и метаморфических горных пород (XII Всероссийское петрографическое совещание) Петрозаводск, 2015. С. 551–554.
- Голубева И.И., Филиппов В.Н., Бурцев И.Н. Метасоматическая редкоземельная и редкометалльная минерализация в ультрамафитах дайкового комплекса на Среднем Тимане (Поднятие Четласс) // Современные проблемы теоретиче-

ской, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2018) ИГ Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар. 2018. С. 30–31.

Голубева И.И., Ремизов Д.Н., Бурцев И.Н., Филиппов В.Н., А.С. Шуйский А.Н. Флюидоэксплозивные ультрамафиты дайкового комплекса Среднего Тимана и их парагенетическая связь с карбонатитами // Региональная геология и металлогения. 2019. № 80. С. 30–44.

Голубева И.И., Филиппов В.Н., Бурцев И.Н. Метасоматический марганцевый ильменит в флюидоэксплозивных щелочных ультрамафитах Среднего Тимана // Современные проблемы георетической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2020). Сыктывкар, 2020. С. 32–33.

Голубева И.И., Мокрушин А.В., Филиппов В.Н., Бурцев И.Н. Хромшпинелиды флюидоэксплозивных даек Среднего Тимана. // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. Апатиты, 2020. С. 112–115.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб: 1 000 000 (третье поколение). Лист Q-39. Объяснительная записка / ВСЕГЕИ. СПб. Картография, 2015. 130 с.

Довжиков Н.А., Довжикова Е.Г., Смыслов С.А. Клинопироксены из щелочно-ультраосновных пород дайкового комплекса Среднего Тимана // Записки ВМО. 1985. Ч. 114, вып. 5. С. 56–605.

Довжикова Е.Г., Бакулина Л.П. Состав и строение ксенокристаллов и глубинных включений в пикритах Четласского Камня // Известия Коми НЦ. 2018. № 2. С. 56–63.

Ивенсен Ю.П. Магматизм Тимана и полуострова Канин. М.:Л.: Наука, 1964. 126 с.

Костохин М.И., Степаненко В.И. Байкальский магматизм Канино-Тиманского региона: Л.: Наука, 1987. 232 с.

Ковальчук Н.С., Шумилова Т.Г., Степаненко В.И. Редкоземельная минерализация в карбонатитах косьюского массива (Средний Тиман) // Зап. РМО. 2013. Т. 142, № 3. С. 32–109

Латин А.В., Толстов А.В., Лисицин Д.В. Кимберлиты и конвергентные породы / ИМГРЭ. М., 2004. 224 с.

Леснов Ф.П. Редкоземельные элементы в ультрамафитах и мафитовых пород и их минералов. Новосибирск: Акад. Изд-во «Гео», 2007. 401 с.

Макеев А.Б., Лебедев В.А., Брянчанинова Н.И. Магматиты Среднего Тимана / УрО РАН. Екатеринбург, 2008. 348 с.

Махлаев Л.В., Пармузин Н.М., Голубева И.И. Минеттовые диатремы Четласского Камня (Средний Тиман) в связи с проблемой алмазности //

Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века. Воронеж. 2003. С. 401–403.

Недосекова И.Л., Удоротина О.В., Владыкин Н.В., Прибавкин С.В. Петрохимия и геохимия дайковых ультрабазитов и карбонатитов четласского комплекса (Средний Тиман) // ЕЖЕГОДНИК-2010 / Тр.ИГГ УрО РАН. 2011. Вып. 158. С. 22–130.

Плаксенко А.Н. Типоморфизм аксессуарных хромшпинелидов ультрамафит-мафитовых магматических формаций. Воронеж: Изд-во ВГУ. 1989. 224 с.

Расс И.Т. Геохимические особенности карбонатитов – индикатор состава, эволюции и дифференциации мантийных магм // Геохимия. 1998. № 2. С. 137–146

Саблуков С.М. О петрохимических сериях кимберлитовых пород // ДАН СССР. 1990. Т. 313, № 4. С. 935–939.

Силаев В.И., Голубева И.И., Хазов А.Ф. и др. Цинкосодержащие и цинкистые хромшпинелиды: химизм и типоморфные значения // Сыктывкарский минералогический сборник. Сыктывкар, 2010. Вып. 126, № 36. С. 110–180.

Степаненко В.И. Поздне- и постмагматические изменения щелочных пикритов Среднего Тимана // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2015. № 7. С. 1–5.

Фролов А.А., Латин А.В., Толстов А.В., Зинчук Н.Н., Белов С.В., Бурмистров А.А. Карбонатиты и кимберлиты (взаимоотношения, минерогения, прогноз). М.: НИИ-Природа. 2005. 540 с.

Шарпенко Л.Н., Кухаренко Е.А., Костин А.Е. Эндогенные рудоносные брекчиевые образования: Методические рекомендации по выявлению эндогенных брекчиевых образований различных генетических типов и оценке их потенциальной рудоносности применительно к задачам Госгеолкарт. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2018. 104 с.

Черный В.Г., Смирнов В.Г., Черная И.П. Формационный анализ магматических пород Тимана // Материалы по геологии и полезным ископаемым северо-востока европейской части СССР. Сыктывкар, 1972. Вып. 7. С. 167–179.

Ahmed Hassan Ahmed, Hassan Mohamed Helmy, Shoji Arai, Masako Yoshikawa. Magmatic unmixing in spinel from late Precambrian concentrically-zoned mafic-ultramafic intrusions // Eastern Desert. Egypt Lithos. 2008. № 104. P. 85–98. 7. P. 167–179.

Tischendorf G., Forster H.I., Gottsmenn B., Rider M., True and brittle micas composition and solid-solution series // Mineralogical Magazine. 2007. June. Vol. 71 (3). P. 285–320.

Yang Bai, Ben-Xun Su, Yan Xiao, David Lenaz, Patrick Asamoah, Sahyi Zi Liang, Chen Chen, Sai – Hogny Yang Origin of Revers Zoned Cr-Spinels

from the Paleoproterozoic Yanmenguan Mafic-Ultramafic Complex in the North Cina Craton // Minerals. 2018. Vol. 8, № 62. P. 1–15.

## Study and Diagnostics of Convergent Rocks on the Example of Carbonated Fluid-Explosive Ultramafic Dyke Complex (Middle Timan)

I.I. Golubeva, A.S. Shuyskiy, V.N. Filippov, I.N. Burtsev

Institute of geology of FRC Komi Scientific Centre of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

54 Pervomayskaya Str., Syktyvkar 167982, Russia. E-mail: iigolybeva2@yandex.ru

Fluid-explosive rocks of the dike complex are identified in the Middle Timan. The rocks have convergent properties due to a combination of explosive and metasomatic processes. The study of the petrographic features of the rocks revealed their explosive nature. Further study of the chemical composition of rock-forming minerals established the source of the mantle material and the paragenetic relationship with carbonatite magmatism. The fluid-explosive rocks of the dyke complex have a long-term multistage formation history. The fluids caused fenitization of the host strata and its disintegration. Solid-gas material of the mantle-crustal compound fills the cracks. At the last stage of formation of fluid-explosive rocks, the rare-metal, rare-earth, and sulfide mineralization took place.

**Key words:** *carbonatite; dykes; fluid; explosions; rare earth and rare-metal-bearing mineralization; Middle Timan.*

### References

Golubeva I.I. 2003. Magmatogennyye flyuidizatsno-eksplozivnyye obrazovaniya Severa Urala [Magmatic fluid-explosive formations of the North Urals]. Yekaterinburg, UrO RAN, p. 131. (in Russian)

Vakhrusheva N.V., Shiryayev A.Ye., Stepanov A.Ye., Bogdanova A.R. 2011. Petrologiya i khromitnost' ultraosnovnogo massiva Ray-Iz. Polyarnyy Ural [Petrology and chromite mineralization of ultrabasic massive Ray-Iz. Polar Urals]. Yekaterinburg, p. 265. (in Russian)

Golubeva I.I., Burtsev I. I. 2015. Problema tipizatsii shchelochnykh ultramafitov daykovogo kompleksa Srednego Timana [Problem of typing of alkaline ultramafic rock of the Middle Urals dyke complex]. In: Petrografiya magmaticheskikh i metamorficheskikh gornyykh porod. Petrozavodsk, pp. 551–554. (in Russian)

Golubeva I.I., Filippov V.N., Burtsev I.N. 2018. Metasomaticheskyye redkozemel'naya i redkometall'naya mineralizatsii v ultramafitakh daykovogo kompleksa na Srednem Timane (Podnyatiye Chetlass) [Metasomatic rare-earth and rare-metal mineralization on the Middle Timan (Chetlass Uplift)]. In: Sovremennyye problemy teoreticheskoy. eksperimental'noy i prikladnoy mineralogii. Syktyvkar, IG Komi NTS UrO RAN, p. 278. (in Russian)

Golubeva I.I., Remizov D.N., Burtsev I.N., Filippov V.N., Shuyskiy A. S. 2019. Flyuidoeksplozivnyye ultramafity daykovogo kompleksa Srednego Timana

i ikh parageneticheskaya svyaz s karbonatitami [Fluid-explosion ultramafic rocks of the Middle Timan dyke complex and their paragenetic association with carbonatite]. Regional'naya geologiya i metallogeniya. 80:30–44. (in Russian)

Golubeva I. I., Filippov V.N., Burtsev I. N. 2020. Metasomaticheskyy margantsevyy ilmenit v flyuidoeksplozivnykh shchelochnykh ultramafitakh Srednego Timana [Metasomatic manganese ilmenite in the fluid-explosive alkaline ultramafic rock of Middle Timan]. In: Sovremennyye problemy teoreticheskoy, eksperimental'noy i prikladnoy mineralogii (Yushkinskiye chteniya – 2020). Syktyvkar, pp. 32–33. (in Russian)

Golubeva I.I., Mokrushin A.V., Filippov V.N., Burtsev I.N. 2020. Khromshpinelidy flyuidoeksplozivnykh dayek Srednego Timana [Chromspinelides of fluid-explosive dykes of the Middle Timan]. In: Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTS RAN. Apatity, pp. 112 – 115. (in Russian)

Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy federatsii. Masshtab: 1 000 000 (tret'ye pokoleniye). List Q-39. Obyasnitelnaya zapiska [State geological map of Russian Federation. Scale: 1 000 000 (third issue). Sheet Q-39. Explanation note]. SPb. SPb Kartografiya. VSEGEI. 2015, p. 130. (in Russian)

Dovzhikov N.A., Dovzhikova Ye.G., Smyslov S.A. 1985. Klinopirokseny iz shchelochno-ultraosnovnykh porod daykovogo kompleksa Srednego Timana [Clinopyroxene from alkaline-ultrabasic dyke

complex of the Middle Timan]. *Zapiski VMO*. 114(5):569–605. (in Russian)

*Dovzhikova Ye.G., Bakulina L.P.* 2018. Sostav i stroeniye ksenokristallov i glubinykh vkluycheniy v pikritakh Chetlasskogo Kamnya [The composition and structure of xenocrystals and depth inclusions in picrites of the Chetlass Rock]. *Izvestiya Komi NC*. 2:56–63. (in Russian)

*Ivensen Yu.P.* 1964. Magmatizm Timana i poluoostrova Kanin [Magmatism of Timan and Kanin peninsula]. *Nauka, M.-L.*, p. 126. (in Russian)

*Kostyukhin M.I., Stepanenko V.I.* 1987. Baykalskiy magmatizm Kanino-Timanskogo regiona [Baikalian magmatism of Kanin-Timan region]. *Nauka, Leningrad*, p. 232s. (in Russian)

*Kovalchuk N.S., Shumilova T.G., Stepanenko V.I.* 2013. Redkozemel'naya mineralizatsiya v karbonatitakh kosyuskogo massiva (Sredniy Timan) [Rare-earth mineralization in carbonitites of Kosyuskiy massive (Middle Urals)]. *Zap. RMO*. 142(3):109–32. (in Russian)

*Lapin A.V., Tolstov A.V., Lisitsin D.V.* 2004. Kimberlity i konvergentnye porodny [Kimberlites and convergent rocks]. *IMGRE, Moskva*, p. 224. (in Russian)

*Lesnov F.P.* 2007. Redko-zemelnye elementy v ultramafitakh i mafitovykh porodakh i ikh mineralakh [Rare-earth elements in ultramafic and mafic rocks, and their minerals]. *Geo. Novosibirsk*, p. 401. (in Russian)

*Makeev A.B., Lebedev V.S., Bryanchaninova N.I.* 2008. Magmatity Srednego Timana [Magmatites of the Middle Timan]. *UrO RAN, Yekaterinburg*, p. 348. (in Russian)

*Makhlaev L.V., Parmuzin N.M., Golubeva I.I.* 2003. Minetovyye diatremy Chetlasskogo Kamnya (Sredniy Timan) v svyazi s problemoy almazonosnosti [Minette diatremes of the Chetlasskiy Rock (Middle Timan)]. *In: Problemy prognozirovaniya, poiskov i izucheniya mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh na poroge XXI veka. Voronezh*, pp. 401–403. (in Russian)

*Nedosekova I.L., Udoratina O.V., Vladykin N.V., Pribavkin S.V.*, 2011. Petrokhimiya i geokhimiya daykovykh ultrabazitov i karbonatitov chetlasskogo kompleksa (Sredniy Timan) [Petrochemistry and geochemistry of dyke ultrabasic rock and carbonatites of the Chetlasskiy Complex (Middle Timan)]. *Yezhegodnik-2010. Trudy IGG UrO RAN*. 158:22–130. (in Russian)

*Plaksenko A.N.* 1989. Tipomorfizm aktsessornykh khromshpinelidov ultramafit-mafitovykh magmaticheskikh formatsiy [Typomorphism of accessory chromspinelides of ultramafic and mafic magmatic formations]. *VGU. Voronezh*, p. 224. (in Russian)

*Rass I.T.* 1998. Geokhimicheskiye osobennosti karbonatitov – indikator sostava, evolyutsii i differentsiatsii mantiynykh magm [Geochemical

carbonatite features. Indicators of composition, evolution, and differentiation of mantle magma]. *Geokhimiya*. 2:137–146. (in Russian)

*Sablukov S.M.* 1990. O petrokhimicheskikh seriyakh kimberlitovykh porod [On petrochemical series of kimberlite rock]. *DAN SSSR*. 313(4):935–939. (in Russian)

*Silayev V.I., Golubeva I.I., Khazov A.F. et al.* 2010. Tsinkosoderzhashchiye i tsinkisty khromshpinelidy: khimizm i tipomorfnye znacheniye [Zinc-bearing and zinc chromspinelides: chemistry and typomorphic significance]. *Syktvykarskiy mineralogicheskii sbornik*. 126(36):110–180. (in Russian)

*Stepanenko V. I.* 2015. Pozdne- i postmagmaticheskiye izmeneniya shchelochnykh pikritov Srednego Timana [Late- and post-magmatic alterations of alkaline picrites from Middle Timan]. *Vestnik IG Komi NTS UrO RAN*. 247:9–13. (in Russian)

*Frolov A.A., Lapin A.V., Tolstov A.V., Zinchuk N.N., Belov S.V., Burmistrov A.A.* 2005. Karbonatity i kimberlity (vzaimootnosheniya, minerageniya, prognoz) [Carbonatites and kimberlites (interaction, minerageny, forecasting)]. *NIA-Priroda. Moskva*, p. 540. (in Russian)

*Sharpenok L.N., Kukhareno Ye.A., Kostin A.Ye.* 2018. Endogennyye rudonosnyye brekchiyevyye obrazovaniya. Metodicheskiye rekomendatsii po vyyavleniyu endogennykh brekchievykh obrazovaniy razlichnykh geneticheskikh tipov i otsenke ikh potentsialnoy rudonosnosti primenitelno k zadacham Gosgeol'kart [Endogenic ore-bearing breccia formations. Methodical recommendations on identification of endogenic breccia formations of different genetic types and assessment of their mineralization potential related to the problems of the State geological mapping]. *VSEGEI. SPb*, p. 104. (in Russian)

*Chernyy V.G., Smirnov V.G., Chernaya I.P.* 1972. Formatsionnyy analiz magmaticheskikh porod Timana [Formation analysis of Timan's rocks]. *Materialy po geologii i poleznym iskopayemym severo-vostoka yevropeyskoy chasti SSSR*. 7:167–179. (in Russian)

*Ahmed Hassan Ahmed, Hassan Mohamed Helmy, Shoji Arai, Masako Yoshikawa.* 2008. Magmatic unmixing in spinel from late Precambrian concentrically-zoned mafic-ultramafic intrusions, Eastern Desert. *Egypt Lithos*. 104:85–98.

*Tischendorf G., Forster H.I., Gottesmann B., Rider M.* 2007. True and brittle micas composition and solid-solution series. *Mineralogical Magazine*. 71(3):285–320.

*Yang Bai, Ben-Xun Su, Yan Xiao, David Lenaz, Patrick Asamoah, Sahyi Zi Liang, Chen Chen, Sai – Hogny Yang.* 2018. Origin of Revers Zoned Cr-Spinels from the Paleoproterozoic Yanmenguan Mafic-Ultramafic Complex in the North China Craton. *Minerals*. 8(62):1–15.