ИЗОТОПНЫЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА МАГМАТИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ ДОЛОМИТ-КАЛЬЦИТОВЫХ ТЕЛ ИЛЬМЕНСКИХ ГОР И ПЛАСТОВСКОГО РАЙОНА ЮЖНОГО УРАЛА

В. Г. Кориневский, Е. В. Кориневский

Институт минералогии ЮУ ФНИЦ МиГ УрО РАН, Миасс

vgkor@mineralogy.ru

Впервые полученные данные об изотопном составе кислорода и углерода кальцитов и графитов доломит-кальцитовых пород Ильменских гор и даек аналогичного состава в Пластовском районе позволили подтвердить предположение об их магматическом генезисе. Определённая по изотопным соотношениям углерода и кислорода в кальците и графите температура образования карбонатных тел (590—1000 °С) близка к интервалу температур (600—900 °С) образования карбонатитовых ассоциаций. По этим же соотношениям изотопов в кальцитах протолиты карбонатных пород располагаются в пределах полей карбонатитов складчатых областей и в переходной зоне к карбонатам морского происхождения. Вероятно, из этого следует, что эти породы являются порождением карбонатной магмы, возникшей при переплавлении осадочных карбонатных пород в зонах субдукции либо под влиянием тепла гранитных интрузий.

Ключевые слова: изотопы углерода и кислорода, кальцит, графит, доломит-кальцитовые карбонатиты. Ильменские горы, Пластовский район, Южный Урал.

ISOTOPIC EVIDENCES OF MAGMATIC NATURE OF THE DOLOMITE-CALCITE BODIES OF THE ILMENY MOUNTAINS AND THE PLASTOVSKY DISTRICT OF THE SOUTH URALS

V. G. Korinevsky, E. V. Korinevsky

Institute of Mineralogy, South Federal Center MiG UB RAS, Miass

The data obtained for the first time on the isotopic composition of oxygen and carbon of calcites and graphites of dolomite-calcite rocks of the Ilmeny Mountains and dykes of a similar composition in the Plastovsky district have confirmed their magmatic genesis. The temperature of formation of carbonate bodies (590—1000 °C), determined from the isotopic ratios of C and O in calcite and graphite, corresponds to the temperature range (600—900 °C) of the formation of carbonatite associations. According to the same ratios of isotopes in calcites, the protoliths of carbonate rocks are located within the carbonatite fields of the folded regions and in the transition zone to carbonates of marine origin. This is probably due to the fact that these rocks are a product of carbonate magma during remelting of sedimentary carbonate rocks in subduction zones, or under the influence of the heat of granite intrusions.

Keywords: carbon and oxygen isotopes, calcite, graphite, dolomite-calcite carbonatites. Ilmeny Mountains, Plastovsky district, South Urals.

Введение

В Ильменских горах известны довольно крупные выходы белых массивных среднезернистых доломит-кальцитовых лейкократовых пород, обычно называемых мраморами [3]. При значительной силикатной примеси в этих породах их относят к кальцифирам [30, 21, 4]. Но существуют мнения, что указанные породы являются представителями специфических карбонатитов [17, 26—28]. Сходные с ильменскими по минеральному составу и структурам карбонатные породы широко распространены в расположенном восточнее Пластовском районе Челябинской области. Здесь они традиционно считаются мраморизованными карбонатными осадками раннекаменноугольного времени [11]. Очевидные различия в минеральном составе, особенно в акцессорной минера-

лизации [10, 35], в содержаниях редких и рассеянных элементов [24, 36], отсутствие непосредственной генетической связи с проявлениями щелочного и ультраосновного магматизма по сравнению с «классическими» карбонатитами породили представления, что доломит-кальцитовые среднезернистые породы Южного Урала, принимаемые за карбонатиты [17, 28,], таковыми не являются [1, 4, 10, 11, 21, 22, 30]. Ю. Л. Капустиным [10] предложено считать эти породы в Ильменских горах гидротермальными жилами. Карбонатитовая (магматическая) природа подобных «сахаровидных» зернистых доломит-кальцитовых пород во многих случаях доказана геологическими наблюдениями в различных регионах мира (лавы, туфы и дайки о. Фуэртевентура и остро-

Для цитирования: Кориневский В. Г., Кориневский Е. В. Изотопные свидетельства магматической природы доломит-кальцитовых тел Ильменских гор и Пластовского района Южного Урала // Вестник геонаук. 2020. 11(311). С. 3—19. DOI: 10.19110/geov.2020.11.1.

For citation: Korinevsky V. G., Korinevsky E. V. Isotopic evidences of magmatic nature of the dolomite-calcite bodies of the Ilmeny Mountains and the Plastovsky district of the South Urals. 2020. 11(311). P. 3—19. DOI: 10.19110/geov.2020.11.1.

вов Зелёного Мыса [34, 37, 38]; дайки и диатремы Чагатайского комплекса Узбекистана [6, 41], дайки и жилы Таймырского полуострова [29], дайки и штоки Забайкалья [26]). Между тем именно в таких «нетипичных» по составу карбонатитах удалённых регионов мира, не несущих характерной редкометалльной, редкоземельной и фосфатной минерализации, обнаружены алмазы [6, 13, 37, 38, 41]. Известные проявления драгоценных камней (корунд, шпинель и др.) Памира также приурочены к карбонатным породам такого состава. Видимо, случайно и находки первых алмазов на Южном Урале приурочены к выходам доломит-кальцитовых «мраморов» в Пластовском районе [14]. В этих же породах обнаружена и вкрапленность золота [12, 14], а также значительные скопления розового корунда и шпинели [11]. Сказанным определяется необходимость выяснения происхождения (магматическое или метаморфическое) доломит-кальцитовых пород Южного Урала, Ильменских гор и Пластовского района в частности. С этой целью полезным окажется получение новых критериев (определение в них изотопов С и О, онтогенетические наблюдения над соотношениями минералов), что уже успешно проделано для ряда других участков Урала [8, 32, 38].

Геологическая ситуация

Самое крупное проявление доломит-кальцитовых пород (мраморов) у подножья восточного склона Ильменских гор вблизи северо-западного берега оз. Бол. Миассово было выявлено А. Г. Баженовым (рис. 1, точка 1). В 1996 г. была оконтурена площадь выходов данных пород [27]. Выяснилось, что они составляют блок длиной 57 м и шириной 16 м в меридиональной полосе бластомилонитов по гнейсам, амфиболитам, кристаллосланцам и жильным телам гранитоидов, разделяющей области развития пород кыштымской и ильменогорской

толщ Ильменогорского метаморфического комплекса. В северной части блока карбонатные породы были вскрыты двумя короткими широтными канавами, ставшими известными как копь 287 Ильменского заповедника. Координаты копи: 55°10'17" с. ш., 60°15'57" в. д. Кальцит-доломитовые породы располагаются на значительном удалении (несколько км) от выходов Ильменогорского массива нефелиновых сиенитов. В то же время именно в них обнаружены дайки биотитовых монцититов и скаполитсодержащих габбро, пироксенитов и пироксен-апатит-амфиболовых слюдитов, то есть пород, спорадически встречающихся в составе Ильменогорско-Вишневогорского массива щелочных пород (рис. 2, [19]). Динамометаморфические изменения (бластомилонитизация) местами проявились в них в виде гнейсовидных текстур. На контакте всех этих тел с вмещающими карбонатными породами скарновые ассоциации минералов не встречены. В районе Вишневых гор уже давно известны [15] обширные выходы магматических скаполитовых пород: сиенитов и нефелиновых сиенитов (миасситов). Очевидно, дайки скаполитовых пород, пересекающие кальцит-доломитовые породы копи 287 (рис. 2), являются пространственно удалённой и, возможно, более молодой фацией интрузивного комплекса нефелиновых сиенитов Ильменогорско-Вишневогорского массива. Тем самым определяется древний (440—445 млн, [21]) домиасситовый возраст карбонатных пород.

Карбонатные породы данного массива содержат неравномерно распределённую акцессорную примесь безжелезистых фтористых флогопита и тремолита, апатита, ярко-зелёного паргасита, актинолита, диопсида, волластонита, благородной шпинели, корунда, граната, рутила, титанита, скаполита, ортоклаза, серпентина, пирита, псевдоморфоз гётита по пириту, очень редко — циркона.

В 3.5 км южнее копи 287, на побережье оз. Бол. Миассово, вдоль берега Мраморного мыса, на площади 40×100 м располагаются скальные обнажения среднезернистых белых кальцитовых пород, имеющих меридиональное простирание и восточное падение под углом 55° (рис. 1, точка 2). Координаты обнажения (копь 228): 55°08'25" с. ш., 60°16'23.2" в. д. Снежно-белые среднезернистые мраморы хорошо обнажены в прибрежной западной стенке Мраморного мыса (копь 228). В отличие от копи 287 здесь эти породы преимущественно кальцитовые, с очень небольшим количеством доломита, содержащие довольно обильные идиоморфные мелкие пластинки графита со скульптурными поверхностями одновременного роста с кристаллами кальцита и фторапатита [37]. Остальные минералы встречаются в акцессорных количествах и обнаруживаются лишь после растворения породы в соляной кислоте. Характерно преобладание среди них округлых кристаллов светло-голубоватого фторапатита, иногда содержащих параллельно расположенные синтаксические включения очень тонких пластинок, возможно графита. Примечательно присутствие редких

Рис. 1. Расположение выходов кальцит-доломитовых пород (звёздочки) на территории Ильменского заповедника: 1 — копь 287, 2 — копь 228 (Мраморный мыс), 3 — оз. Бол. Ишкуль

Fig. 1. Location of outcrops of calcite-dolomite rocks (asterisk) on territory of the Ilmeny Reserve: 1 — pit 287, 2 — pit 228 (Mramorny Cape), 3 — Bol. Ishkul Lake

Рис. 2. Геологическая схема строения копи 287 [18]: 1 — средне- и крупнозернистые кальцит-доломитовые породы (карбонатиты), 2 — пегматоидные жилки паргасит-диопсидового состава, 3 — флогопит-паргасит-диопсидовая порода, 4 — дайка скаполит-паргасит-диопсидового флогопитового слюдита (глиммерита), 5 — диопсид-кальцит-скаполитовая порода пегматоидной структуры, 6 — скаполит-диопсидовое габбро пегматоидной структуры, 7 — скаполит-эпидот-диопсидовое габбро, 8 — жила диопсид-кварц-скаполитового пегматита, 9 — позднепалеозойские биотитовые граниты с письменной структурой, 10 — номера и места отбора проб, 11 — элементы залегания пород

Fig. 2. Geological sketch of pit 287 [18]: 1 — medium- and coarse-grained calcite-dolomite rocks (carbonatites), 2 — pegmatoid veins of pargasite-diopside composition, 3 — phlogopite-pargasite-diopside rock, 4 — dyke of scapolite-pargasite-diopside glimmerite, 5 — diopside-calcite-scapolite rock of pegmatoid structure, 6 — scapolite-diopside gabbro of pegmatoid gabbro, 7 — scapolite-epidote-diopside gabbro, 8 — vein of diopside-quartz-scapolite pegmatite, 9 — Late Paleozoic biotite granites with written structure, 10 — numbers and places of sampling, 11 — elements of bedding of rocks

зерен высокотемпературных минералов: шеелита, оливина, сапфирина, плагиоклаза, граната, диопсида, паргасита, саданагаита, тремолита, серпентина, ильменита, рутила, скаполита, отсутствие в них благородной шпинели, корунда, циркона, ортоклаза. В целом же набор аксессуарных минералов в породах Мраморного мыса аналогичен таковому из мраморов копи 287.

Непосредственных контактов тела мраморов с вмещающими породами не установлено. Вблизи мраморов, восточнее находятся протяженные гривки гнейсовидных биотитовых кристаллосланцев, аналогичных тем, что севернее слагают нижнюю часть кыштымской толщи на Миассовском участке [18]. В мраморах наблюдаются отдельные дайки гранитных пегматитов.

Можно заключить, что в описанных выше случаях непосредственных взаимоотношений доломит-кальцитовых пород (мраморов) с вмещающими их породами в Ильменских горах не наблюдается. Поэтому главный признак карбонатитов — интрузивные контакты — здесь отсутствует. Карбонатные породы отнесены к мраморам из-за их массивного сложения, среднезернистой структуры, наличия минеральных примесей, залегания в виде протяженных тел среди метаморфических пород, которым приписывается вулканогенно-осадочная природа [3].

Иная ситуация наблюдается на западном берегу оз. Бол. Ишкуль (рис. 1, точка 3). В пределах древнего (поздний архей) Селянкинского блока ильменогорского комплекса здесь встречено пластовое тело крупнозернистых диопсидитов мощностью до 7 м [17], в осевой части которого располагается несколько тонких линз кальцитовых пород (рис. 3). Некарбонатные минералы в них занимают 20—40 % объема и представлены характерным для карбонатитов подобного состава [6, 41, 13, 29] набором:

диопсидом, форстеритом, шпинелью (плеонаст), паргаситом, флогопитом, титанитом, фторапатитом, графитом, скаполитом, гялофаном и др. Многие из зерен имеют овально-округлую форму с гладкими поверхностями, свидетельствующими об оплавлении в глубинных условиях. Карбонатиты характеризуются повышенными содержаниями Cr, Ni; некоторые минералы (флогопит, ортоклаз) относятся к бариевым разновидностям. Линзы карбонатных пород имеют постепенные переходы к вмещающим их диопсидитам. Минеральный состав соседних линз может существенно различаться (преимущественно шпинель-оливиновый или флогопит-графит-диопсидитовый). Вопреки существующим представлениям об отнесении этих карбонатных пород Ишкуль к кальцифирам [30, 4] в их минеральном составе, взаимоотношениях минералов, геологическом положении мы видим все признаки магматического происхождения этих пород (синхронность образования породообразующих минералов, наличие оплавленных кристаллов, высокотемпературная и высокобарическая ассоциация минералов, их набор, присущий многим карбонатитам, см. [17]).

В стенках карьера Светлинского золоторудного месторождения в Пластовском районе доломит-кальцитовыми породами образованы маломощные (десяти сантиметров) крутопадающие сближенные дайки и прожилки полосчатой и массивной текстуры, рассекающие метаморфизованные вулканогенно-осадочные породы [14, 16]. Недавно было вскрыто штокообразное тело мелкозернистых желтовато-кремовых доломитов. В расположенном поблизости Кучинском известковом карьере подобные породы с аналогичной минерализацией слагают серию параллельных крутопадающих пластовых тел

Схема выходов диопсидитов Map of diopsidites outcrops

Рис. 3. Геологическая схема выходов тела диопсидитов на западном берегу оз. Бол. Ишкуль и разрезы обнажений [17]: 1 — задренованные участки, 2 — диопсидиты, 3 — линзы карбонатитов, 4 — гнейсы и мигматиты селянжинской толщи протерозоя с прослоями амфиболитов, 5 — элементы залегания пород, 6 — номера и места отбора проб карбонатитов

Fig. 3. The geological sketch of the outcrops of the body of diopsidites on the western shore of Lake Bol. Ishkul and sections of outcrops [17]: 1 — soddy plots, 2 — diopsidites, 3 — carbonatite lenses, 4 — gneisses and migmatites of the Selankinsky stratum of the Proterozoic with interbeds of amphibolites, 5 — elements of bedding of rocks, 6 — samplingsites and sample numbers of carbonatites

(рис. 4), имеющих зонально-симметричное строение, грубозернистую структуру геометрического отбора в осевой зоне [14]. Их разделяют полосы более мелкозернистых карбонатных пород, являющихся частью мощной (до 1000 м) толщи мраморизованных известняков с остатками каменноугольной фауны.

Особенности минерального состава кальцит- доломитовых карбонатитов

Наличие синтаксических вrostков доломита в кальците (рис. 5, с, d), участков графических срастаний кальцита и доломита (рис. 5, b), индукционных поверхностей синхронного роста доломита и кальцита (рис. 5, a) однозначно свидетельствуют об одновременном образовании кальцита и доломита в описываемых мраморах. Это создает предпосылки для определения температуры образования данных пород по современному кальцит-доломитовому геотермометру [39]. К сожалению, сделать это не получилось, поскольку и кальциты, и доломиты имеют очень низкие содержания железа (табл. 3).

Описываемые породы большей частью обладают массивной текстурой и среднезернистой структурой. В осевых частях крутопоставленных даек карбонатит-пегматитов в Кучинском карьере (рис. 4) структура нередко является гигантозернистой с признаками геометрического отбора от краев даек к их середине. Это однозначно говорит о кристаллизации породы из расплава [28]. Массивная текстура в разрезе карбонатитового тела копи 287 в отдельных участках сменяется отчетливо полосчатой, подчеркнутой неравномерным распределением мелких кристаллов доломита (рис. 6, a) или пирита (рис. 6, c). Скрытая расслоенность проявляется и в неравномерном распределении акцессорных минералов. Обычно они образуют рассредоточенную сыпь в массе породы (рис. 6, b), не будучи приуроченными к каким-либо трещинам или прожилкам. При этом большинство кристаллов имеет идиоморфную огранку и индукционные границы совместного роста с другими минералами карбонатной матрицы (рис. 6, d—f).

Характерна приуроченность наибольшего количества отдельных видов акцессорных минералов лишь к

некоторым прослоям (полосам) в составе карбонатных тел. Это особенно заметно по минералам яркой окраски или необычной формы (паргасит, шпинель, рисовидные зерна тремолита) либо по присутствию экзотических образований — железистых или стекловатых микросферул (рис. 7). Округлые голубоватые кристаллы фторапатита в карбонатитах Мраморного мыса (рис. 8, b) образуют скопления лишь в отдельных частях выходов этих пород. Это можно сказать и про находки в них железистых микросферул, зерен форстерита, сапфирина, граната и шеелита. Столь необычная ассоциация минералов (минералы группы сапфирина, оливины, гранаты) недавно стала известна в паралавах Монголии [53], возникших во время подземных угольных пожаров путём расплавления при очень высоких температурах осадочных пород, содержащих прослои известняков.

В описанных случаях в минералах можно наблюдать синтаксические вrostки графита и кварца во флогопите, апатите (рис. 8, d), гранатах (рис. 8, e, f), кальците, что свидетельствует об одновременности их образования. Это замечание касается и соотношений доломита и кальцита (рис. 5), шпинели и корунда с кальцитом, плагиоклаза и кальцита, сульфидов железа с кальцитом и т. д. Не обнаружено макро- и микроморфологических признаков неоднократного замещения кальцита доломитом [28], как это утверждается [11], равно как и замещения шпинели корундом и наоборот. Заметных проявлений метасоматоза в карбонатных породах, принимаемых за мраморы и кальцифиры, не зафиксировано. Если они проявились, то это можно наблюдать (рис. 9). При этом остаются реликты исходных минералов. Утверждения, что корундовая и шпинелевая минерализация в карбонатных породах (мраморах) Пластовского района возникла в результате многократных процессов метасоматоза [11], в этом свете выглядят голословными.

В отличие от Ильменских гор, в Пластовском районе имеются доказательства (резкие секущие контакты, структуры геометрического отбора, скрытая или явная полосчатость, обусловленная распределением акцессорных минералов, синхронный рост большинства минералов) интрузивной природы тел доломит-кальцитовых пород

Рис. 4. Серия параллельных даек карбонатитов среди мраморизованных известняков в стенке Кучинского карьера.
Фото А. А. Евсеева

Fig. 4. Series of parallel dykes of carbonatites among marbled limestones in the wall of the Kuchinsky quarry. Photo by A. A. Evseev

(даек, штоков), но и те и другие содержат близкий набор аксессуарных минералов (табл. 1) и малое количество редкоземельных элементов. Циркон, монацит, пироклор, щелочные амфиболы, ильменит и магнетит в них практически отсутствуют. Это обстоятельство даёт косвенные доказательства близости генезиса (карбонатитовой приро-

ды) описываемых пород Ильменских гор и Пластовского района, обуславливает отличия от известных жильных карбонатитов Ильменогорско-Вишневогорского комплекса [24, 36], связанных своим происхождением с проявлениями щелочного магматизма.

Для подтверждения этой идеи мы попробовали использовать также распределение изотопов С и О в этих породах.

Методы исследования

Изотопные исследования выполнены при содействии Т. Г. Шумиловой в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН (аналитик И. В. Смолева). Разложение карбонатов и измерение изотопного состава углерода и кислорода производились на аналитическом комплексе фирмы Termo Fisher Scientific (Германия), включающем систему подготовки и ввода проб Gas Bench II, соединённую с масс-спектрометром DELTA V Advantage. Значения $\delta^{13}\text{C}$ даны в промилле относительно стандарта PDB, значения $\delta^{18}\text{O}$ — относительно стандарта SMOW. При калибровке использованы международные стандарты NBS 18 и NBS 19. Ошибка определения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ составляет $\pm 0.1\%$ (1σ).

Химический состав карбонатов определен В. А. Котляровым (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН) на сертифицированном растровом электронном микроскопе РЭММА-202М с энергодисперсионной приставкой LZ-5 Link Systems с Si-Li-детектором. Работа велась на полированных зёрнах в эпоксидной матрице с углеродным напы-

Рис. 5. Взаимоотношения кальцита и доломита в мраморах Ильменских гор и Пластовского района: а — индукционные поверхности синхронного роста кальцита (Cal), доломита (Dol) и флогопита (Phl); б — графические сростания кристаллов доломита и кальцита. Дайка в Кучинском карьере; с, d — синтаксические вросстки доломита в кальците: с — дайка в карьере Светлинского золоторудного месторождения, d — копь 287 Ильменского заповедника. а, с, d — фотографии шлифов, николи параллельны, б — фото протравленной поверхности образца

Fig. 5. The relationship of calcite and dolomite in the marbles of the Ilmeny Mountains and the Plastovsky district: а — induction surfaces of the simultaneous growth of calcite (Cal), dolomite (Dol) and phlogopite (Phl); б — graphic intergrowths of dolomite and calcite crystals. Dyke in the Kuchinsky quarry; с, d — syntactic growths of dolomite in calcite: с — dyke in the quarry of the Svetlinsky gold ore deposit, d — pit 287 of the Ilmeny Reserve. а, с, d — photo of thin sections, николи parallel, б — photo of the etched surface of the sample

Рис. 6. Структурные взаимоотношения минералов в кальцит-доломитовых карбонатах: а — обогащенные мелкими кристаллами доломита отдельные прослои в кальцитовый матрице; б — мелкая вкрапленность благородной шпинели, пирита и корунда в кальцитовый матрице; с — прослои кристаллов пирита в кальцитовый матрице породы; д — индукционные границы кристалла флогопита с окружающими зёрнами кальцита; е — кристалл плагиоклаза в кальцитовый матрице; ф — сросток кристаллов благородной шпинели и кальцита. Граница между ними компромиссная (индукционная). а, б, с, ф — фото образцов породы и отдельных зёрен минералов; д, е — фото шлифов, николи скрещены. Cal — кальцит, Dol — доломит, Phl — флогопит, Gr — графит, Pl — плагиоклаз, Spl — благородная шпинель, Py — пирит, Crn — корунд. Места отбора: а — копь 287, б, д, ф — дайки в Кучинском карьере, с — дайка в Светлинском карьере

Fig. 6. Structural relationships of minerals in calcite-dolomite carbonatites: а — individual interlayers in the calcite matrix enriched with small dolomite crystals; б — fine dissemination of noble spinel, pyrite, and corundum in the calcite matrix; с — interlayers of pyrite in the calcite matrix; д — induction boundaries of the phlogopite crystal with the surrounding calcite grains; е — plagioclase crystal in the calcite matrix; ф — aggregate of crystals of noble spinel and calcite. The border between them is a compromise (induction). а, б, с, ф — photo of rock samples and individual grains of minerals; д, е — photo of thin sections, crossed nicols. Cal — calcite, Dol — dolomite, Phl — phlogopite, Gr — graphite, Pl — plagioclase, Spl — noble spinel, Py — pyrite, Crn — corundum. Sampling sites: а — pit 287, б, д, ф — dykes in the Kuchinsky quarry, с — dyke in the Svetlinsky quarry

лением, при ускоряющем напряжении 20 кВ, малом токе электронного пучка ($3 \cdot 10^{-10}$ А) и минимальном диаметре пучка (1–2 мкм).

Количественная обработка энергодисперсионных спектров производилась с помощью программы Magallanes 2.2. Для сравнения использовались препараты из шашки ASTM JMEX Scientific Limited MJNM 25-53, серия Mineral Mount № 01-044 и минералы известного состава. Большинство элементов определялось по спектральным линиям К-серии. Стандартами для измеренных элементов послужили диопсид (Mg, Ca, Si), жадеит (Al), родонит (Mn), альбит (Na), ортоклаз (K), соединения TiO_2 (Ti), Fe_2O_3 (Fe), сфалерит (S, Zn), галенит (Pb) и чистые элементы V, Cr, Ni, Co. Для большинства элементов нижние пределы обнаружения составляли 0.2–0.3 %.

Основные результаты и обсуждение

Результаты определения изотопного состава углерода и кислорода в зернах кальцита из мраморов Ильменских гор и Пластовского района представлены в таблице 2. Характер распределения их фигуративных точек на диаграмме (рис. 10) близок к таковому исследованных К. Ивановым и др. [8] аналогичных пород других районов Урала. Большинство из точек попадает в поле карбонатитов складчатых областей [5], одна из точек (СВ-1) располагается в поле осадочных морских карбонатов, две пробы из даек в Кучинском карьере и проба из Мраморного мыса находятся между полями карбонатитов складчатых областей и осадочными карбонатами. Такой разброс содержаний изотопов, по мнению С. Степанова и др. [32], демонстрирует, скорее все-

Рис. 7. Акцессорные минералы в кальцит-доломитовых карбонатитах копи 287: а — кристаллы паргасита, б — кристаллы фторапатита, с — кристаллы тремолита, д — кристаллы благородной шпинели, е — самородное железо (Fe) в ядре микро-сферулы, покрытой оболочкой гематита (Hem), ф — сферула силикатного стекла. а — д — фото под бинокулярным микроскопом; с, ф — фото в отраженных электронах на СЭМ РЭММА-202 М

Fig.7. Accessory minerals in calcite-dolomite carbonatites of pit 287: a — pargasite crystals, b — fluorapatite crystals, c — tremolite crystals, d — noble spinel crystals, e — native iron (Fe) in the core of a microspherule covered with a hematite shell (Hem), f — silicate glass spherule. a — d — photo under a binocular microscope; c, f — photo in reflected electrons by SEM REMMA-202 M

го, степень участия атмосферного кислорода и поверхностных вод при образовании карбонатных пород. В этой связи авторы [32, с. 269] полагают, что «диаграмма, используемая для определения типа мантии для карбонатитов Азиатского континента [5], не позволяет надёжно определять тип источника веществ для минерализованных карбонатных образцов западного склона Урала. Для таких исследований необходим анализ изотопного состава Sr и Nd». Тем не менее кальцит из линз карбонатитов внутри дайки диопсидитов из оз. Бол. Ишкуль (проба Ишк. 54) имеет состав изотопов С и О, укладывающийся в «мантийный» квадрат первичных карбонатитов (поле 1 на рис. 9), что соответствует геологической обстановке нахождения этих пород в нашем случае.

Соотношение изотопов углерода, содержащихся в кальците и графите, часто используется в качестве чувствительных геотермометров для метаморфизованных карбонатных пород. Большинство таких термометров калибровались по высокометаморфизованным мраморам. Рекристаллизация и укрупнение кристаллических индивидов кальцита и графита происходит при температурах выше 500 °С, что позволяет применять их там,

где часто отсутствуют надёжные петрологические термометры. В нашем исследовании были применены различные версии кальцит-графитового термометра, позаимствованные из работ [42, 47, 49, 57]. Температура перекристаллизации определялась исходя из следующих уравнений:

$$\begin{aligned}\Delta_{(Cc-Gr)} &= -0.007487 \cdot T(^{\circ}\text{C}) + 8.68 \text{ [57]}, \\ \Delta_{(Cc-Gr)} &= 5.81 \cdot 10^6 \cdot T^{-2}(\text{K}) - 2.61 \text{ [42]}, \\ \Delta_{(Cc-Gr)} &= 3.56 \cdot 10^6 \cdot T^{-2}(\text{K}) \text{ [47]}.\end{aligned}$$

Соответственно, значения температуры вычислялись по формулам:

$$\begin{aligned}T(^{\circ}\text{C}) &= (8.68 - \Delta_{(Cc-Gr)}) / 0.007487 \text{ [57]}, \\ T(^{\circ}\text{C}) &= \sqrt{(5.81 \cdot 10^6 / (\Delta_{(Cc-Gr)} + 2.61)) - 273.15} \text{ [42]}, \\ T(^{\circ}\text{C}) &= \sqrt{(3.56 \cdot 10^6 / \Delta_{(Cc-Gr)}) - 273.15} \text{ [47]},\end{aligned}$$

где $\Delta_{(Cc-Gr)} = 10^3 \ln(1000 + \delta^{13}\text{C}_{\text{Cc}}) / (1000 + \delta^{13}\text{C}_{\text{Gr}})$.

Мы смогли отобрать для изотопных исследований лишь две пробы сосуществующих графита и кальцита — из среднезернистых пород Мраморного мыса с очень незначительной примесью других минералов и из карбонатных линз в осевой части магматического тела диопсидитов с западного берега оз. Бол. Ишкуль, где примесь других минералов очень велика (20—40 об. %). Графит в них присутствует в виде полигональных пластин-

чатых кристаллов, нередко в виде сростков с кальцитом, диопсидом, оливином, апатитом, флогопитом, амфиболом, шпинелью. Согласно Ю. Багдасарову и др. [2], присутствие графита в карбонатах говорит о восстановительной обстановке их формирования и больших глубинах (≥ 10 – 15 км) становления. Из данных табл. 4 следует, что карбонатные породы Мраморного мыса, сходные по минеральному составу с подобными породами копи 287, формировались в интервале температур 590 – 640 °C, а карбонатные линзы из диопсидитов Ишкуля — при температуре 750 – 810 °C. В последнем случае по минеральным геотермометрам и геобарометрам температура

образования линз карбонатных пород определена [4] как 830 – 845 °C. Для сравнения укажем, что по изотопным соотношениям углерода в кальците и графите кальцитовые карбонаты Чагатайского комплекса Узбекистана начали кристаллизоваться при 775 °C [13], а карбонаты Индии — при 800 °C [56]. В сочетании с приведенными выше данными о больших глубинах формирования графита изотопные соотношения углерода и кислорода в сосуществующих графите и кальците свидетельствуют о магматической (карбонатитовой) природе вмещающих их карбонатных пород, обычно принимаемых за мраморы или кальцифиры [4, 21, 30]. Эти данные, как

Рис. 8. Акцессорные минералы в кальцитовых карбонатах Мраморного мыса (коп 287): а — кристалл графита, б — округлые кристаллы фторапатита, с — зёрна сапфирина, д — кристалл фторапатита с синтаксическими вростками пластинок графита (черное), е — пироп-альмандин (Prp-Alm) с округлыми включениями кварца (Qz), ф — гроссуляр-альмандин (Grs-Alm) с включениями кварца. а, д–ф — фото в отраженных электронах на СЭМ РЭММА-202 М, б — фото под бинокулярным микроскопом

Fig. 8. Accessory minerals in calcite carbonatites of Cape Marmara (the pit 287): а — graphite crystal, б — rounded fluorapatite crystals, с — sapphirine grains, д — fluorapatite crystal with syntactic ingrowths of graphite plates (black), е — pyrope-almandine (Prp-Alm) with rounded quartz inclusions (Qz), ф — grossular-almandine (Grs-Alm) with quartz inclusions. а, д–ф — photo in reflected electrons by SEM REMMA-202 M, б — photo under a binocular microscope

Рис. 9. Акцессорные минералы в кальцит-доломитовых карбонатах и продукты их замещения: а — замещение энстатита тремолитом, б — замещение диопсида тремолитом и кварцем, с — замещение чермакита альбитом и кварцем, д — псевдоморфоза каолинита по кристаллу мусковита, е — псевдоморфозы гётита по кристаллам пирита, ф — реликт пирита в ядре псевдоморфозы гётита по пириту. а — д, ф — фото в отраженных электронах на СЭМ РЭММА-202 М, е — фото под бинокулярным микроскопом

Fig. 9. Accessory minerals in calcite-dolomite carbonatites and products of their replacement: а — replacement of enstatite with tremolite, б — replacement of diopside with tremolite and quartz, с — replacement of chermakite with albite and quartz, д — pseudomorphism of kaolinite in the muscovite crystal, е — pseudomorphs of goethite in pyrite crystals, ф — relict of pyrite in the core of pseudomorphs of goethite in pseudomorphs of goethite in pseudomorphs. а — д, ф — photo in reflected electrons by SEM REMMA-202 M, е — photo under a binocular microscope

Таблица 1. Список минералов из кальцит-доломитовых карбонатитов Ильменских гор и Кучинского участка Пластовского района

Table 1. List of minerals from calcite-dolomite carbonatites of the Ilmeny Mountains and the Kuchinsky site of the Plastovsky district

№	Минералы Minerals	Зимник (коп 287) Winter road (pit 287)	Мраморный мыс (коп 228) Mramorny cape (pit 228)	Кучинский карьер Kuchinsky quarry	№	Минералы Minerals	Зимник (коп 287) Winter road (pit 287)	Мраморный мыс (коп 228) Mramorny cape (pit 228)	Кучинский карьер Kuchinsky quarry
1	Актинолит / Actinolite	+			34	Пирротин / Pyrrhotite	+	+	+
2	Альмандин / Almandine	+		+	35	Пироп-альмандин Pyrope-almandine		+	
3	Альмандин-гроссуляр Almandine-grossular	+			36	Плагиоклаз кислый Plagioclase acidic	+	+	+
4	Андрадит / Andradite	+	+	+	37	Плагиоклаз основной Plagioclase basic	+	+	
5	Анортит / Anorthite	+			38	Рутил / Rutile	+	+	+
6	Биотит / Biotite	+	+		39	Саданагаит / Sadanagaite		+	
7	Везувиан / Vesuvian			+	40	Сапфирин / Sapphirine	+	+	
8	Волластонит / Wollastonite	+		+	41	Сера самородная Native sulfur			+
9	Галенит / Galena	+		+	42	Серпентин / Serpentine	+	+	
10	Гематит / Hematite	+	+		43	Скаполит / Scapolite	+	+	
11	Гётит / Goethite	+		+	44	Спессартин-альмандин Spessartine-almandine	+	+	
12	Графит / Graphite	+	+	+	45	Сфалерит / Sphalerite	+		+
13	Гроссуляр / Grossular	+			46	Титанит / Titanite	+	+	+
14	Гроссуляр-альмандин Grossular-almandine	+	+		47	Тремолит / Tremolite	+	+	+
15	Диопсид / Diopside	+	+	+	48	Уваровит / Uvarovite			+
16	Доломит / Dolomite	+	+	+	49	Фторфлогопит Fluoroflogopite	+	+	+
17	Дравит / Dravite			+	50	Флюорит / Fluorite			+
18	Железо самородное Native iron	+	+		51	Фторапатит / Fluorapatite	+	+	+
19	Ильменит / Ilmenite	+	+		52	Фтортремолит Fluorotremolite			+
20	Калишпат Potassium feldspar	+		+	53	Халькопирит / Chalcopyrite	+		+
21	Кальцит / Calcite	+	+	+	54	Хлорит / Chlorite	+	+	+
22	Кварц / Quartz	+	+	+	55	Хондродит / Chondrodite			+
23	Корунд (рубин) Corundum (Ruby)	+		+	56	Хромит / Chromite		+	
24	Магнезиогастингсит Magnesiogastingsite	+			57	Хроммагнетит Chrommagnetite		+	
25	Магнезиогорнбленд Magnesiogornblende		+		58	Циркон / Zircon	+	+	
26	Магнетит / Magnetite	+	+		59	Цоизит / Zoisite	+	+	
27	Молибденит / Molybdenite		+		60	Чермакит / Chermakite		+	
28	Мусковит / Muscovite			+	61	Шпинель / Spinel	+		+
29	Норбергит / Norbergite			+	62	Эденит / Edenite	+		
30	Оливин / Olivine		+		63	Энстатит / Enstatite	+		
31	Парагонит / Paragonite	+			64	Эпидот / Epidote	+	+	+
32	Паргасит / Pargasite	+	+	+	65	Шеелит / Scheelite		+	
33	Пирит / Pyrite	+		+					

Примечание. Таблица составлена по нашим данным с привлечением сведений из работ [11, 28]. Крест — минерал присутствует, пустая ячейка — сведения отсутствуют.

Note. The table is compiled according to our data using information from the works [11, 28]. Cross — mineral present, empty cell — no information.

Рис. 10. Соотношение изотопов О и С в кальцит-доломитовых породах (карбонатитах) Ильменских гор и Пластовского района Челябинской области (по данным табл. 2). Поля на диаграмме [8]: 1 — первичные магматические карбонатиты Западного Алдана, 2 — карбонатиты обрамления платформ, 3 — карбонатиты складчатых областей [5], 4 — карбонатиты, 5 — морские (осадочные) карбонаты [48]

Fig. 10. The ratio of O and C isotopes in calcite-dolomite rocks (carbonatites) of the Ilmeny Mountains and the Plastovsky district of the Chelyabinsk region (according to table 2). Fields in the diagram (cited by [8]): 1 — primary magmatic carbonatites of Western Aldan, 2 — carbonatites of the platform framing, 3 — carbonatites of the folded regions [5], 4 — carbonatites, 5 — marine (sedimentary) carbonates [48]

Таблица 2. Изотопный состав кальцита из доломит-кальцитовых пород (карбонатитов) Ильменских гор и Пластовского района Челябинской области

Table 2. Isotopic composition of calcite from dolomite-calcite rocks (carbonatites) of the Ilmeny Mountains and Plast district of the Chelyabinsk region

№ п.п.	Проба Sample	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$	Порода / Rocks
1	СВ-1	2.54	28.92	Мелкозернистая Cal-Dol с Phl и Gr полосчатая с мелкими выделениями серы Small-grained Cal-Dol with Phl and Gr banded with small sulphur secretions
2	СВ-9	1.77	18.10	Крупнозернистая Cal-Dol с отдельными зернами Prg, Vs, Py Coarse-grained Cal-Dol with separate grains of Prg, Vs, Py
3	Куч-1	3.09	27.49	Мелкозернистая с отдельными зернами алой Spl, Py, Qz Small-grained with separate grains of red Spl, Py, Qz
4	Куч-9	2.61	27.08	Гигантозернистая с отдельными зернами Phl, Tr, Prg Giant-grained with separate grains of Phl, Tr, Prg
5	337-4	3.52	22.39	Среднезернистая Cal-Dol с отдельными зернами Zrn, микросферулами Fe Medium-grained Cal-Dol with separate grains of Zrn, Fe microspherules
6	338-35	3.39	21.64	Среднезернистая Dol-Cal Medium-grained Dol-Cal
7	МРМ-1	1.43	20.76	Среднезернистая Cal с отдельными зернами F-Ap, Grt, Gr, Tr Medium-grained with separate grains of F-Ap, Grt, Gr, Tr
8	13/07	1.60	24.80	Среднезернистая Cal с отдельными зернами F-Ap, Grt, Gr, Tr Medium-grained with separate grains of F-Ap, Grt, Gr, Tr
9	Ишк.54-Д	-5.96	11.67	Крупнозернистая Cal с примесью зёрен (25–30 об. %) Fo, Spl, Di, Prg, F-Ap, Kfs, Phl, Ttn, Scp, Gr, Qz, Dol Coarse-grained Cal with impurity of grains (25-30Vol%) Fo, Spl, Di, Prg, F-Ap, Kfs, Phl, Ttn, Scp, Gr, Qz, Dol

Примечание. Анализы выполнены И.В. Смолевой в ЦКП «Геонаука» ИГ Коми НЦ УрО РАН. Анализ 8 заимствован из [8]. Cal — кальцит, Dol — доломит, Spl — шпинель, Fo — форстерит, Di — диопсид, Prg — паргасит, F-Ap — фторапатит, Kfs — калишпат, Phl — флогопит, Ttn — титанит, Scp — скаполит, Qz — кварц, Gr — графит, Vs — ваэсит, Py — пирит, Tr — тремолит, Grt — гранат, Zrn — циркон.

Note. Analyses performed by I.V. Smoleva in Geonauka CCU IG Komi SC UB RAS. Analysis 8 is borrowed from [8]. Cal — calcite, Dol — dolomite, Spl — spinel, Fo — forsterite, Di — diopside, Prg — pargasite, F-Ap — fluorapatite, Kfs — potassium feldspar, Phl — phlogopite, Ttn — titanite, Scp — scapolite, Qz — quartz, Gr — graphite, Vs — vaesite, Py — pyrite, Tr — tremolite, Grt — garnet, Zrn — zircon.

Таблица 3. Состав карбонатов из доломит-кальцитовых мраморов (карбонатитов) Южного Урала

Table 3. Composition of carbonates from dolomite-calcite marbles (carbonatites) of the South Urals

Локализация Location	Мраморный мыс Mramorny Cape		Копь 287 (Зимник) Pit 287 (winter road)						Кучинский карьер Kuchinsky quarry				Светлинский карьер Svetlinsky quarry			
Минералы Minerals	Cal	Dol	Cal	Dol	Cal	Dol	Cal	Dol	Cal	Dol	Cal	Dol	Cal	Dol	Cal	Dol
№ п.п.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
FeO		0.25	0.01	0.59	0.06	0.13		0.08		0.28	0.19		—	—		
MnO					0.11	0.06	0.15	0.05	0.13	0.14		0.14	—	0.03		
MgO	0.33	20.53	5.72	21.56	0.04	22.22	1.30	20.83	1.99	21.42		21.42	1.11	20.98	2.04	21.24
CaO	55.52	31.81	49.53	30.11	55.53	30.15	53.61	31.09	53.31	31.01	55.15	31.01	55.18	30.96	53.29	30.81

Примечание. Cal — кальцит, Dol — доломит. Прочерк — не обнаружено, пустая ячейка — нет данных. В пробе 14 обнаружено 0.43 мас. % SrO, в пробе 15 — 0.44 мас. % SO₃. Состав карбонатов определен В. А. Котляровым на СЭМ РЭММА-202 М.

Note. Cal — calcite, Dol — dolomite. Empty cell — not detected. Dash - not found, empty cell — no data. In sample 14 found 0.43 wt. % of SrO, in sample 15 — 0.44 wt. % of SO₃. The composition of carbonates was performed by V. A. Kotlyarov on SEM REMMA-202 M.

и определения по породам из Мраморного мыса и оз. Ишкуль, укладываются в интервал температур образования (в среднем от 600 до 900 °С) карбонатитовых ассоциаций [38].

Вероятно, эти породы являются порождением карбонатной магмы, возникшей при переплавлении осадочных карбонатных пород в зонах субдукции [7], либо под влиянием тепла гранитных интрузий. Гипотеза возникновения таким путём карбонатных магм уже высказывалась [25], а сейчас поддерживается и другими исследователями [7, 28, 29, 31]. Этим можно объяснить резкую обеднённость таких карбонатитов редкими землями и металлами по сравнению с «классическими» карбонатитами. Происхождение последних связано с щелочным-ультраосновным магматизмом, поскольку протолит таких карбонатных магм (осадочные карбонатные толщи) изначально содержит очень мало этих элементов. Очевидно, был прав О. Иванов [9], призывавший не привлекать для отнесения к карбонатитам лишь те карбонатные породы магматического происхождения, которые несут рудную (редкометалльную и редкоземельную) нагрузку, которая часто возникает в постмагматическую стадию. Этот же вывод вытекает и из данных [23]

о существенном различии возраста карбонатитов Ильмено-Вишневогорского комплекса (425 ± 44 млн лет) и редкометалльного оруденения в них (231 ± 29 млн лет).

Наличие в образцах исследуемых пород синтаксических сростков различных минералов — пироксенов, амфиболов, гранатов, слюд и плагиоклазов — позволило определить температуры возникновения таких сростков, используя инструментальный геотермометрических сенсоров авторской программы Petroexplorer [20]. Эти сенсоры разработаны на основе классических геотермометров различных авторов, хорошо известных в петрологической литературе [9, 33, 40, 43, 45, 50—53]. Результаты определений температуры образования для различных равновесных парагенезисов каждого образца приведены в таблице 6. Разброс значений температуры для одних и тех же образцов, определенных различными методами, достаточно велик, но он укладывается в пределы, установленные для карбонатитовых ассоциаций (см. выше). Равновесное давление для этих парагенезисов, определенное с помощью амфиболовых геобарометров [33, 44, 55], колеблется в диапазоне от 8 до 12 кбар.

Таким образом, независимыми методами геотермометрии подтверждены высокотемпературные и вы-

Таблица 4. Температура образования доломит-кальцитовых карбонатитов Ильменских гор по кальцит-графитовому геотермометру разных авторов

Table 4. The temperature of formation of dolomite-calcite carbonatites of the Ilmeny Mountains using calcite-graphite geothermometer of various authors

Образец Sample	Кальцит / Calcite		Графит / Graphite	$\Delta_{(Cc-Gr)}$	Температура (°C) / Temperature (°C)			
	$\delta^{18}O$	$\delta^{13}C$	$\delta^{13}C$		[57]	[42]	[47]	[49]
МРМ-1	20.76	1.43	−2.83(3)	4.26	591	646	641	580
Ишк. 54	11.67	−5.96	−8.97(4)	3.01	758	744	814	795

Примечание. Анализы выполнены И. В. Смолевой в ЦКП «Геонаука» ИГ Коми НЦ УрО РАН.

Note. Analyses performed by I. V. Smoleva in Geonauka CCU of IG Komi SC UB RAS.

Таблица 5. Изотопные отношения углерода и кислорода в кальцитах из карбонатитов разных регионов

Table 5. Isotopic ratios of carbon and oxygen in calcites from carbonatites of different regions

№ анализа Test No.	Регион, участок / Region, Area	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$	Источник Source
1	Индия / India	−3.1—6.0	5.5—7.0	[54]
2	Индия / India	−2.0—6.0	6.0—15.0	[56]
3	Африка / Africa	−4.0—8.0	6.0—10.0	[46]
4	о. Фуэртевентура / Fuerteventura Island	−5.5	6.5—7.0	[38]
5	Косью / Kosyu	−3.6—6.5	8.6—21.1	[38]
6	Таймыр / Taumyr	−2.3—16.5	12.6—21.0	[29]
7	Ишкуль / Ishkul	−5.96	11.67	Наши данные Our data
8	Миассово (коп 287) / Miassovo (pit 287)	+3.52	22.39	-/-
9	Миассово (коп 287) / Miassovo (pit 287)	+3.39	21.64	-/-
10	Миассово (Мраморный мыс) / Miassovo (Mramorny Cape)	+1.43	20.76	-/-
11	Миассово (Мраморный мыс) / Miassovo (Mramorny Cape)	+1.6	24.8	-/-
12	Кучино (Пластовский р-н) / Kuchino (Plastovsky district)	+3.09	27.49	-/-
13	Кучино (Пластовский р-н) / Kuchino (Plastovsky district)	+2.61	27.08	-/-
14	Светлинский (Пластовский р-н) / Svetlinsky (Plastovsky district)	+2.54	28.92	-/-
15	Светлинский (Пластовский р-н) / Svetlinsky (Plastovsky district)	+1.77	18.6	-/-

сокобарические условия образования кальцит-доломитовых пород Ильменских гор и Пластовского района. Это обстоятельство наряду с залеганием пород в форме даек (примеры из Кучинского и Светлинского карьеров) подтверждает нашу гипотезу об отнесении описанных выше пород к магматическим образованиям (карбонатитам).

Закключение

Тела доломит-кальцитовых пород Ильменских гор и Пластовского района Челябинской области имеют много общего в акцессорной минерализации и геохимической специфике. Их прямое сопоставление затруднено из-за отсутствия в Ильменских горах признаков интрузивного внедрения карбонатных пород, тогда как в Пластовском районе они очевидны (залегание в форме даек и штоков). Впервые полученные данные об изотопном составе О и С кальцитов и графитов доломит-кальцитовых пород Ильменских гор и даек аналогичного состава в Пластовском районе позволили подтвердить предположение об их магматическом генезисе. Сравнимые кальцит-доломитовые породы Ильменских гор и Пластовского района не обнаруживают пространственной связи с проявлениями щелочного магматизма. Более того, в Ильменских горах они возникли до начала становления миасситового комплекса, т. е. они древнее 440—445 млн лет. В Пластовском же районе дайки кальцит-доломитового состава, рассекающие мраморы и известняки нижнего карбона, оказываются значительно более молодыми (менее 328 млн лет). При всём этом изотопные соотношения С и О в их кальците близки (табл. 5). В других разновозрастных карбонатитах мира, имеющих единый магматический источник, также наблюдается близкое соотношение изотопов С и О в кальците. Так, несмотря на огромный временной интервал

внедрения массивов карбонатитов Индии (от 2400 до 65 млн лет), средние величины изотопных соотношений $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ у них находятся в пределах небольших колебаний ($\delta^{13}\text{C} = -3.1...6.0\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = 5.3—7.0\text{‰}$ [54]). Вероятно, при образовании карбонатитов одной формационной принадлежности, независимо от возраста внедрения, сохраняется единый источник поступающего вещества — мантийный для «классических» карбонатитов и коровый для кальцит-доломитовых, описываемых нами, что сказывается на минеральном составе и геохимической специфике образующихся пород. Это отчетливо проявляется при сравнении данных по изотопии С и О, приведенных в таблице 5. Они относятся к проявлениям карбонатитов, связанных с ультраосновным-щелочным магматизмом (анализы 1—7), и к породам, такой связи не обнаруживающим (анализы 8—15).

Определённая по изотопным соотношениям С и О в кальците и графите и по другим минеральным геотермометрам изученных нами пород температура образования карбонатных тел (590—1000 °С) близка к интервалу температур образования (600—900 °С) карбонатитовых ассоциаций [38]. По этим же соотношениям изотопов в кальцитах составы протолитов карбонатных пород располагаются в пределах полей карбонатитов складчатых областей и в переходной зоне к карбонатам морского происхождения [5]. Наши данные подтверждают мнение о таких карбонатитах: «Главная отличительная их особенность — отсутствие редкометалльных акцессорных минералов и низкие содержания редкометалльных компонентов (Nb, Zr, Се и др.). С карбонатитами их объединяет морфология тел, текстуры и структуры пород» [29, стр. 101]. Мы полагаем, что штокообразные тела и жилы карбонатитов можно трактовать как интрузивные тела специфической по составу карбонатной магмы.

Таблица 6. Оценка температур образования кальцит-доломитовых пород по различным геотермометрам на основании состава сосуществующих аксессуарных минералов

Table 6. Assessment of temperatures of formation of calcite-dolomite rocks according to various geothermometers based on the composition of coexisting accessory minerals

Участок Area	Мраморный мыс (копь 228) / Mramornyy Cape (pit 228)							Копь 287 / Pit 287				Ишкуль / Ishkul				
Сенсоры Sensors	Grt	Px	Grt	Amp	Bt	Px	Pl	Amp	Grt	Px	Grt	Amp	Pl	Px	Amp	Amp
SiO ₂	37.69	52.03	37.69	43.02	34.15	55.63	62.2	46.62	37.26	54.53	38.28	48.86	45.9	54.01	48.86	48.86
TiO ₂	0.11	0.53	0.11	1.4	9.56	0	0	0.71	0	0	0.18	0.48	34.55	0.23	0.48	0.48
Al ₂ O ₃	21.46	2.24	21.46	16.97	13.27	0.88	23.79	11.11	20.58	1.36	21.4	15.22	0	1.21	15.22	15.22
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0.16	0	0	0.33	0	0.14	0.33	0.33
FeO	33.36	9.95	33.36	5.97	21.06	0.75	0	12.48	32.07	4.84	27.64	6.69	0	1.69	6.69	6.69
Fe ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MnO	0.38	0.16	0.38	0	0	0	0	0.15	0	0.69	0.85	0.05	0	0	0.05	0.05
MgO	4.66	13.37	4.66	16.31	9.27	17.67	0.07	12.66	19.94	14.57	9.68	15.57	0	17.83	15.57	15.57
CaO	1.51	21.23	1.51	11.44	0	23.91	5.25	11.28	12.7	23.4	1.98	13.73	17.65	24.69	13.73	13.73
Na ₂ O	0	0.46	0	2.58	0.15	0.65	8.21	1.2	2.55	0.48	0	1.45	1.36	0	1.45	1.45
K ₂ O	0	0	0	0.24	8.4	0	0.39	0.33	0.48	0	0	1.81	0	0	1.81	1.81
Сумма	99.17	99.97	99.17	97.93	95.86	99.17	99.91	96.54	97.30	99.87	100.01	104.19	99.46	99.8	104.19	104.19
Т, °С	715 [41]		737 [52]		741 [51]		712 [46]	827 [54]		987 [44]		658 [52]		1051 [54]		
Р, кбар	8 [45, 57]		10 [45, 57]		10 [45, 57]		10 [33]	9 [45, 57]		8 [45, 57]		8 [2, 3]		8 [45, 57]		12 [2, 3]

Участок / Area	Светлинский карьер / Svetlinsky quarry							Кучинский карьер / Kuchinsky quarry						
Сенсоры / Sensors	Grt	Px	Grt	Amp	Bt	Px	Pl	Grt	Amp	Grt	Amp	Pl	Amp	Amp
SiO ₂	35.27	51.9	35.27	44.07	34.94	35.27	44.07	39.54	44.91	44.91	44.91	63.91	44.91	63.91
TiO ₂	1.47	0.37	1.47	0.76	4.6	1.47	0.76	0	0	0	0	0	0	0
Al ₂ O ₃	1.88	3.29	1.88	16.47	16.05	1.88	16.47	22.03	15.06	15.06	15.06	22.79	15.06	22.79
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.3	0.3	0	0	0
FeO	0	9.06	0	6.59	23.44	0	6.59	26.99	0	0	0	0	0	0
Fe ₂ O ₃	28.06	0	28.06	0	0	28.06	0	0	0	0	0	0	0	0
MnO	0	0.14	0	0	0.3	0	0	0.41	0	0	0	0	0	0
MgO	0.59	15.06	0.59	15.61	6.97	0.59	15.61	8.56	20.04	20.04	20.04	20.04	20.04	20.04
CaO	32.53	19.17	32.53	11.6	7.89	32.53	11.6	2.33	13.43	13.43	13.43	3.75	13.43	3.75
Na ₂ O	0	0.46	0	2.21	0.16	0	2.21	0	3.16	3.16	3.16	9.07	3.16	9.07
K ₂ O	0	0	0	0.3	9.11	0	0.3	0	0.93	0.93	0.93	0.55	0.93	0.55
Сумма / Total	99.8	99.45	99.8	97.61	95.57	99.8	97.61	99.86	97.83	97.83	97.83	100.07	97.83	100.07
Т, °С	567 [55]		788 [44]		812 [51]		574 [52]	868 [52]		868 [52]		670 [33]		670 [33]
Р, кбар / P, Kbar	10 [45, 57]		10 [45, 57]		10 [45, 57]		10 [45, 57]	9 [33]		9 [33]		9 [33]		9 [33]

Примечание. Давление по [45, 57] бралось как среднее арифметическое из двух значений каждого геобарометра.

Note. Pressure according to [45, 57] was taken as the arithmetic mean of two values of each geobarometer.

Авторы признательны доктору геол.-мин. наук Т. Г. Шумиловой (Коми НЦ УрО РАН) за ценные советы и содействие в проведении изотопных исследований и С. В. Колисниченко за предоставление образцов карбонатных пород из Светлинского и Кучинского карьеров в Пластовском районе.

Литература

1. Багдасаров Ю. А. К вопросу о рациональной систематике пород карбонатитового семейства // Отечественная геология. 2008. № 1. С. 87—93.
2. Багдасаров Ю. А., Банникова Л. А., Ивановская И. Н. Изотопный состав углерода сосуществующих графитов и карбонатов из карбонатитов Черниговской зоны (Приазовье) и некоторые черты их генезиса // Доклады АН СССР. 1982. Т. 262. № 4. С. 967—970.
3. Баженов А. Г., Белогуб Е. В., Ленных В. И., Рассказова А. Д. Уфимская широтная структура Урала. Путеводитель экскурсий. Миасс: ИМин УрО РАН, 1992. 89 с.
4. Вализер П. М., Черднichenко С. В., Краснобаев А. А. Минералогия, геохимия и возраст метакarbonатно-силикатных пород Ильменогорского комплекса // Литосфера. 2019. № 1. С. 93—110.
5. Владыкин Н. В. Изотопная систематика и глубинные источники щелочных-карбонатитовых комплексов Сибири и Монголии // Щелочной магматизм Земли и его рудоносность. Киев, 2007. С. 43—45.
6. Диваев Ф. К. Чагатайский комплекс карбонатитов: новый тип магматических пород Узбекистана // Узбекский геол. журнал. 1996. № 6. С. 32—41.
7. Иванов К. С. О природе карбонатитов Урала // Литосфера. № 1. 2011. С. 20—33.
8. Иванов К. С., Ерохин Ю. В., Погромская О. Э. Изотопия углерода и кислорода в карбонатитах и мраморах Урала // Тезисы докл. XI Всерос. петрограф. совещ. Т. 1. Екатеринбург, УрО РАН, 2010. С. 271—272.
9. Иванов О. К. О принципах систематики карбонатитов и эндогенных карбонатных пород // Уральский геологический журнал. 2010. № 1. С. 77—81.
10. Капустин Ю. Л. Минералогия карбонатитов. М.: Наука, 1971. 288 с.
11. Кисин А. Ю. Месторождения рубина в мраморах (на примере Урала). Свердловск: УрО АН СССР, 1991. 130 с.
12. Кисин А. Ю., Мурзин В. В., Притчин М. Е. Золото в мраморах Светлинского карьера (Южный Урал) // Ежегодник-2016. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2017. С. 223—226.
13. Козарко Л. Н., Рябчиков И. Д., Диваев Ф. К., Вол Ф. Режим соединений углерода алмазоносных карбонатитов Узбекистана // Геохимия. 2010. № 11. С. 1123—1131.
14. Колисниченко С. В., Попов В. А. «Русская Бразилия» на Южном Урале. Минералы долин рек Санарки, Каменки и Кабанки: Энциклопедия уральского камня. Челябинск: Санарка, 2008. 528 с.
15. Коптев-Дворников В. С., Кузнецов Е. А. Борзовское месторождение корунда: Петрологическое исследование. М.: Госгеолтехиздат, 1931. 318 с.
16. Кориневский В. Г. Ваэсит (NiS_2) — первая находка в карбонатитах // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2019. № 5. С. 13—19.
17. Кориневский В. Г., Кориневский Е. В. Новый тип карбонатитов на Урале // Литосфера. 2013. № 3. С. 43—56.
18. Кориневский В. Г., Кориневский Е. В. Результаты геолого-петрографических исследований Ильменогорского комплекса за последние 20 лет (1998—2018 гг.) // Минералогия. 2020. № 2. С. 67—99.
19. Кориневский В. Г., Кориневский Е. В., Котляров В. А. Редкометалльная минерализация в необычных скаполитовых породах Ильменских гор (Южный Урал) // Записки РМО. 2018. № 4. С. 52—68.
20. Кориневский Е. В. PetroExplorer — система для создания геохимических информационно-аналитических массивов в процессе тематических исследований // Геоинформатика. 2015. № 4. С. 48—53.
21. Краснобаев А. А., Вализер П. М., Бушарина С. В., Медведева Е. В. Цирконология миаскитов Ильменских гор (Южный Урал) // Геохимия. 2016. № 9. С. 797—813.
22. Левин В. Я., Роненсон Б. М., Самков В. С., Левина И. А., Сергеев Н. С., Киселёв А. П. Щелочно-карбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург: Уралгеолком, 1997. 274 с.
23. Недосекова И. Л. Возраст и источники вещества Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса (Урал, Россия): геохимические и изотопные Rb-Sr, Sm-Nd, Lu-Hf-данные // Литосфера. 2012. № 5. С. 77—95.
24. Недосекова И. Л., Прибавкин С. В. Карбонатиты Ильмено-Вишневогорского комплекса: геология, вещественный состав, возраст, геохимия, источники вещества. Геохимия, петрология, минералогия и генезис щелочных пород. Материалы Всероссийского совещания. Миасс: ИМин УрО РАН, 2006. С. 167—173.
25. Петров В. П. Магма и генезис магматических горных пород. М.: Недра, 1972. 134 с.
26. Попов В. А. К реинтерпретации генезиса тел карбонатных пород на юго-западном побережье озера Байкал // Уральский минералогический сборник № 9. Миасс: ИМин УрО РАН, 1999. С. 102—108.
27. Попов В. А., Макагонов Е. П., Никандров С. Н. О новых проявлениях карбонатитов на Урале // Уральский минералогический сборник № 8. Миасс: ИМин УрО РАН, 1998. С. 240—248.
28. Попов В. А., Колисниченко С. В. К минералогии карбонатитов Русской Бразилии на Южном Урале // Урал. минералог. сб. № 15. Миасс: ИМин УрО РАН, 2008. С. 75—84.
29. Проскурнин В. Ф., Петров О. В., Гавриш А. В., Падерин П. Г., Мозолева И. Н., Петрушков Б. С., Багаева А. А. Раннемезозойский пояс карбонатитов полуострова Таймыр // Литосфера. 2010. № 3. С. 95—102.
30. Рассказова А. Д., Ленных В. И., Вализер Н. И. Кальцифиры и мраморы нижних толщ Ильмено-Вишневогорского комплекса // Ежегодник-1985. Свердловск: ИГГ УНЦ АН СССР, 1986. С. 68—71.
31. Скляр Е. В., Федоровский В. С., Котов А. Б., Лавренчук А. В., Мазукабзов А. М., Старикова А. Е. Карбонаты — продукты плавления метасадочных пород в коллизионных обстановках: Характер проявления и тектонические следствия // Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя: Материалы XLIII Тектонического совещ. Т. 2. М.: ГЕОС, 2010. С. 261—265.
32. Степанов С. Ю., Лепёхин Е. Н., Паламарчук Р. С., Шарпёнок Л. Н. Возраст и изотопные характеристики минерализованных карбонатных пород, сопряжённых с магматитами Кусинско-Копанского габбрового интрузива, Южный Урал // Металлогения древних и современных океанов — 2019. Миасс — Екатеринбург: Форт-Диалог-Исеть, 2019. С. 266—269.
33. Ферштатер Г. Б. Эмпирический плагиоклаз — роговообманковый барометр // Геохимия. 1990. № 3. С. 328—342.

34. Фрих-Хар Д. И., Ашихмина Н. А., Муравицкая Г. Н., Севостьянов М. А. Об аксессуарных минералах эффузивных карбонатитов и фонолитов островов Зелёного Мыса // Доклады АН СССР. 1988. Т. 303. № 6. С. 1455—1459.
35. Фролов А. А., Толстов А. В., Белов С. В. Карбонатитовые месторождения России. М.: НИИ-Природа, 2003. 494 с.
36. Чередниченко С. В., Котляров В. А. Минералогическая характеристика карбонатитов Ильменогорского миекитового массива (Южный Урал) // Записки РМО. 2014. Т. 143. № 3. С. 105—114.
37. Шафрановский Г. И. Кристалломорфология графита из Ильменских гор // Минералогические исследования эндогенных месторождений Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1982, 44—53.
38. Шумилова Т. Г. Находка алмазов и графитоподобного вещества в карбонатитах о. Фуэртевентура, Испания // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2005. № 10. С. 17—18.
39. Шумилова Т. Г., Ковальчук Н. С., Мингалев А. Н., Диваев Ф. К. Изотопный состав углерода и кислорода карбонатов и карбонатитов Косьюского массива (Средний Тиман) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2012. № 4. С. 9—13.
40. Anovitz L. M., Essene E. J. Phase equilibria in the system CaCO_3 - MgCO_3 - FeCO_3 . Journal of Petrology, 1987, V. 28, pp. 389—414.
41. Ashchepkov I. V., Pokhilenko N. P., Vladykin N. V., Rotman A. Y., Afanasiev V. P., Logvinova A. M., Kostrovitsky S. I., Pokhilenko L. N., Karpenko M. A., Kuligin S. S., Malygina E. V., Stegnitsky Y. B., Alymova N. A., Khmelnikova O. S. Reconstruction of mantle sections beneath Yakutian kimberlite pipes using monomineral thermobarometry // In: Coltorty M. & Goire G. M. (eds) Metasomatism in Oceanic and Continental Lithospheric Mantle, Geological Society, London, Special Publications, 2008, V. 293, pp. 335—352.
42. Djuraev A. D., Divaev F. K. Melanocratic carbonatites — new type of diamond-bearing rocks, Uzbekistan. Mineral Deposits: Processes to Processing. Stanley et al. (eds.), Balkema, Rotterdam, 1999, V.1, pp. 639—642.
43. Dunn S. R., Valley J. W. Calcite-graphite isotope thermometry: a test for polymetamorphism in marble, Tudor gabbro aureole, Ontario, Canada. Journal of Metamorphic Geology, 1992, V. 10, pp. 487—501.
44. Ellis D. J., Green D. H. An Experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria // Contrib. Mineral. Petrol., 1979, V. 71, pp. 13—22.
45. Hammarström J. M., Zen E.-A. Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer // Amer. Miner., 1986, V. 71, No. 11/12, pp. 1297—1313.
46. Holland T., Blundy J. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry // Contrib. Mineral. Petrol., 1994, V. 116, pp. 433—447.
47. Horstmann U. E., Verwoerd W. J. Carbon and oxygen isotope variations in southern African carbonatites. Journal of African Earth Sciences, 1997, V. 25, No. 1, pp. 115—136.
48. Kitchen N. E., Valley J. W. Carbon isotope thermometry in marbles of the Adirondack Mountains, New York Journal of Metamorphic Geology, 1995, V. 13, pp. 577—594.
49. Kerrich R. W. Geochemical evidence on the source of fluids and solutions for shear zone hosted mesothermal Au deposits. Mineralization in Shear Zones. J. T. Bursnal (Ed.). Geological Association of Canada. Short Course Notes, 1989, No. 6, pp. 129—197.
50. Kueter N., Lilley M. D., Schmidt M. W., Bernasconi S. M. Experimental carbonatite/graphite carbon isotope fractionation and carbonate/graphite geothermometry. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2019, V. 253, pp. 290—306.
51. Perchuk L. L. Derivation of thermodynamically consistent system of geothermometers and geobarometers for metamorphic and magmatic rocks. Progress in metamorphic and magmatic petrology. L. L. Perchuk (Ed.). Cambridge University Press, 1990, pp. 93—112.
52. Perchuk L. L., Lavrent'eva I. V. Some equilibria involving garnet, orthopyroxene and amphibole as geothermometers and geobarometers for metamorphic rocks. Experiment-89, Informative volume, Moscow, Nauka, 1990, pp. 44—45.
53. Peretyazhko I. S., Savina E. A., Khromova E. A. Minerals of the rhönite-kuratite series in paralavas from a new combustion metamorphic complex of Choir-Nyalga Basin (Central Mongolia): chemistry, mineral assemblages, and formation conditions // Mineralogical Magazine, 2017, V. 81, pp. 949—974.
54. Plyusnina L. P. Experimental study on metabasite equilibria, geothermometry. Experiment in the solution of topical problems in geology. Moscow, Nauka, 1986, pp. 174—183.
55. Powell R. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene geothermometer revised. // J. Metamorphic Geol., 1985, V. 3, No. 3, pp. 231—243.
56. Ray J. S., Ramesh R. Stable carbon and oxygen isotopic composition of Indian carbonatites. International Geology Review, 2006, V. 48, No. 1, pp. 17—45.
57. Schmidt M. W. Experimental calibration of the Al-in-hornblende geobarometer at 650 °C, 3.5—13.0 kbar. // Terra abstracts, 1991, V. 3, No. 1, pp. 30.
58. Srivastava R., Taylor L. A. Carbon- and oxygen-isotope variations in Indian carbonatites. International Geology Review, 1996, No. 5, pp. 419—429.
59. Valley J. W., O'Neil J. R. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ exchange between calcite and graphite: a possible thermometer in Grenville marbles. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1981, V. 45, pp. 411—419.

References

1. Bagdasarov Yu. A. *K voprosu o ratsional'noy sistematike porod karbonatitovogo semejstva* (To the question about the reasonable systematic of rocks of carbonatite family). Otechestvennaya geologiya, 2008, No. 1, pp. 87—93.
2. Bagdasarov Yu. A., Bannikova L. A., Ivanovskaya I. N. *Izotopnyi sostav ugleroda sosushchestvuyushchikh grafitov i karbonatov iz karbonatitov Chernigovskoy zony (Priazov'ye) i nekotorye cherty ikh genezisa* (Carbon isotope composition of coexisting graphites and carbonates from carbonatites of the Chernigov zone (Priazov'ye) and some features of their genesis). Doklady AS USSR, 1982, V. 262, No. 4, pp. 967—970.
3. Bazhenov A. G., Belogub E. V., Lennykh V. I., Rasskazova A. D. *Ufimskaya shirotnaya struktura Urala. Putevoditel' ekskursiy* (Ufa latitudinal structure of the Urals. Travel Guide). Miass: IMin UB RAS, 1992, 89 p.
4. Valizer P. M., Cherednichenko S. V., Krasnobaev A. A. *Mineralogiya, geokhimiya i vozrast metakarbonatno-silikatnykh porod Ilmenogorskogo kompleksa* (Mineralogy, geochemistry, and age of metacarbonate-silicate rocks of the Ilmenogorsky complex). Litosfera, 2019, No. 1, pp. 93—110.

5. Vladykin N. V. *Izotopnaya sistematika i glubinnye istochniki shchelochnikh-karbonatitovykh kompleksov Sibiri i Mongolii* (Isotope systematics and deep sources of alkaline-carbonatite complexes in Siberia and Mongolia). Alkaline magmatism of the Earth and its ore content, Kiev, 2007, pp. 43–45.
6. Divaev F. K. *Chagatayskiy kompleks karbonatitov — novyi tip magmaticheskikh porod Uzbekistana* (Chagatai complex of carbonatites — a new type of igneous rocks in Uzbekistan). Uzbek geol. zhurnal, 1996. No. 6, pp. 32–41.
7. Ivanov K. S. *O prirode karbonatitov Urala* (About of the nature of carbonatites of the Urals). Litosfera, 2011, No. 1, pp. 20–33.
8. Ivanov K. S., Erokhin Yu. V., Pogromskaya O. E. *Izotopiya ugleroda i kisloroda v karbonatitakh i mramorakh Urala* (Isotopy of carbon and oxygen in carbonatites and marbles of the Urals). Proceedings of conference, V. 1, Yekaterinburg, UB RAS, 2010, pp. 271–272.
9. Ivanov O. K. *O printsipakh sistematiki karbonatitov i endogennykh karbonatnykh porod* (About of the principles of systematics of carbonatites and endogenetic carbonate rocks). Ural. geol. zhurnal, 2010, No. 1, pp. 77–81.
10. Kapustin Yu. L. *Mineralogiya karbonatitov* (Mineralogy of carbonatites). Moscow: Nauka, 1971, 288 p.
11. Kisin A. Yu. *Mestorozhdeniya rubina v mramorakh [na primere Urala]* (Ruby deposits in marbles (by example of Urals)). Sverdlovsk: UB AS USSR, 1991, 130 p.
12. Kisin A. Yu., Murzin V. V., Pritchinn M. E. *Zoloto v mramorakh Svetlinskogo karera (Yuzhnyi Ural)* (Gold in the marbles of the Svetlinsky quarry (South Urals)). Ezhegodnik-2016, Ekaterinburg: IGG UrO RAN, 2017, pp. 223–226.
13. Kogarko L. N., Ryabchikov I. D., Divaev F. K., Vol F. *Rezhym soedineniy ugleroda almazonosnykh karbonatitov Uzbekistana* (The mode of carbon compounds of diamondiferous carbonatites of Uzbekistan), Geokhimiya, 2010, V. 11, pp. 1123–1131.
14. Kolisnichenko S. V., Popov V. A. *“Russkaya Braziliya” na Yuzhnom Urale. Mineraly dolin rek Sanarki, Kamenki i Kabanki: Enziklopediya uralskogo kamnya* (“Russian Brazil” in the South Urals. Minerals of the valleys of Sanarka, Kamenka and Kabanka rivers. Encyclopaedia of Urals stone). Chelyabinsk: Sanarka Publ., 2008, 528 p.
15. Koptev-Dvornikov V. S., Kuznetsov E. A. *Borзовское месторождение корунда. Петрологическое исследование*. (Borзовское corundum deposit. Petrological research). Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1931, 318 p.
16. Korinevsky V. G. *Vaesit (NiS₂) — pervaya nakhodka v karbonatitakh* (Vaesite (NiS₂) — the first find in carbonatites). Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2019, No. 5, pp. 13–19.
17. Korinevsky V. G., Korinevsky E. V. *Novyi tip karbonatitov na Urale* (New type of carbonatites in the Urals). Litosfera, 2013, No. 3, pp. 43–57.
18. Korinevsky V. G., Korinevsky E. V. *Rezultaty geologo-petrograficheskikh issledovaniy Ilmenogorskogo kompleksa za poslednie 20 let (1998–2018 g.g.)* (Results of the 1998–2018 geological-petrographic studies of the Ilmenogorsky complex, South Urals), Mineralogiya, 2020, No. 2, pp. 67–99.
19. Korinevsky V. G., Korinevsky E. V., Kotlyarov V. A. *Redkometallnaya mineralizatsiya v neobychnykh skapolitovykh porodakh Ilmenskikh gor* (Rare metal mineralization in unusual scapolite rocks of the Ilmeny Mountains [South Urals]), Zapiski RMO, 2018, No. 4, pp. 52–68.
20. Korinevsky E. V. PetroExplorer — a system for creating geochemical information and analytical arrays in the process of case studies. Geoinformatika, 2015, No. 4, pp. 48–53.
21. Krasnobaev A. A., Valizer P. M., Busharina S. V., Medvedeva E. V. *Zirkonologiya miaskitov Ilmenskikh gor (Yuzhnyi Ural)* (Zirconology of miaskites of the Ilmeny Mountains [South Urals]). Geokhimiya, 2016, No. 9, pp. 797–813.
22. Levin V. Ya., Ronenson B. M., Samkov V. S., Levina I. A., Sergeev N. S., Kiselev A. P. *Shchelochno-karbonatitivye komplekсы Urala* (Alkaline-carbonatite complexes of the Urals), Ekaterinburg: Uralgeolkom, 1997, 274 p.
23. Nedosekova I. L. *Vozrast i istochniki veshchestva Ilmeno-Vishnevogorskogo shchelochnogo kompleksa [Ural, Rossiya]: geokhimicheskie i izotopnye Rb-Sr, Sm-Nd, Lu-Hf dannye* (Age and substance sources of the Ilmeno-Vishnevogorsky alkaline complex (Ural, Russia): geochemical and isotopic Rb-Sr, Sm-Nd, Lu-Hf data). Litosfera, 2012, No. 5, pp. 77–95.
24. Nedosekova I. L., Pribavkin S. V. *Karbonatity Ilmeno-Vishnevogorskogo kompleksa: geologiya, veshchestvennyi sostav, vozrast, geokhimiya, istochniki veshchestva* (Carbonatites of the Ilmeno-Vishnevogorsky complex: geology, material composition, age, geochemistry, sources of matter). Geochemistry, petrology, mineralogy and genesis of alkaline rocks. Materials of the All-Russian meeting. Miass: IMin UB RAS, 2006, pp. 167–173.
25. Petrov V. P. *Magma i genesis magmaticheskikh gornykh porod* (Magma and the genesis of igneous rocks). Moscow: Nedra, 1972, 134 p.
26. Popov V. A. *K interpretatsii genezisa tel karbonatnykh porod na yugo-zapadnom poberezhie ozera Baikal* (To reinterpretation of the genesis of bodies of carbonate rocks on the southwestern coast of Lake Baikal). Ural. mineralog. sb. No 9. Miass: IMin UB RAS, 1999, pp. 102–108.
27. Popov V. A., Makagonov E. P., Nikandrov S. N. *O novykh proyavleniyakh karbonatitov na Urale* (On new manifestations of carbonatites in the Urals). Ural. mineralog. sb. No 8. Miass: IMin UB RAS, Miass, 1998, pp. 240–248.
28. Popov V. A., Kolisnichenko S. V. *K mineralogii karbonatitov Russkoy Brazili na Yuzhnom Urale* (To the mineralogy of carbonatites of Russian Brazil in the Southern Urals). Ural. mineralog. sb No 15. Miass: IMin UB RAS, 2008, pp. 75–84.
29. Proskurnin V. F., Petrov O. V., Gavrish A. V., Paderin P. G., Mozoleva I. N., Petrushkov B. S., Bagaeva A. A. *Rannemezozoyiskiy poiyas karbonatitov poluostrva Taimyr* (Early-Mezozoic belt of carbonatites of the Taimyr peninsula). Litosfera, 2010, No. 3, pp. 95–102.
30. Rasskazova A. D., Lennykh V. I., Valizer N. I. *Kaltsifiry i mramory nizhnikh tolshch Ilmeno-Vishnevogorskogo kompleksa* (Calciphires and marbles of low suites of the Ilmeno-Vishnevogorsky complex). Ezhegodnik-2016, Sverdlovsk: IGG USC AS USSR, 1986, pp. 68–71.
31. Sklyarov E. V., Fedorovsky V. S., Kotov A. B., Lavrenchuk A. V., Mazukabzov A. M., Starikova A. E. *Karbonality — produkty plavleniya metaosadochnykh porod v kollizionnykh obstanovkakh* (Carbonalites — products of melting of the metasedimentary rocks in collision situations, character of manifestation and tectonic consequences). Tektonika i geodinamika skladchatykh poiyasov i platform fanerozoia. Materialy XLIII Tektonicheskogo soveshchaniya, V. 2. Moscow: GEOS, 2010, pp. 261–265.

32. Stepanov S. Yu., Lepekhin E. N., Palamarchuk R. S., Sharpenok L. N. *Vozrast i izotopnyye kharakteristiki mineralizovannykh karbonatnykh porod, sopryazhennykh s magmatitami Kusinsko-Kopanskogo gabbrovogo intruziva, Yuzhnyi Ural* (Age and isotopic characteristics of mineralized carbonate rocks associated with magmatites of the Kusinsko-Kopanskogo gabbro intrusion, South Urals). Metallogeny of Ancient and Modern Oceans — 2019. Miass — Yekaterinburg: Fort-Dialog-Iset, 2019, pp. 266—269.
33. Fershtater G. B. Empirical plagioclase — hornblende barometer. *Geokhimiya*, 1990, No. 3, pp. 328—342.
34. Frikh-Khar D. I., Ashikhmina N. A., Muravitskaya G. N., Sevostyanov M. A. *Ob aktsessornykh minerakakh effuzivnykh karbonatitov ostrovov Zelenogo Mysa* (On accessory minerals of effusive carbonatites and phonolites of the Capo Verde Islands). *Doklady AS USSR*, 1988, V. 303, No. 6, pp. 1455—1459.
35. Frolov A. A., Tolstov A. V., Belov S. V. *Karbonatitovye mestorozhdeniya Rossii* (Carbonatite deposits of Russia). Moscow: NIA Priroda, 2003, 494 p.
36. Cherednichenko S. V., Kotlyarov V. A. *Mineralogo-geokhimicheskaya kharakteristika karbonatitov Ilmenogorskogo miaskitovogo massiva* (Mineralogical and geochemical characteristics of carbonatites of the Ilmenogorsky miaskite massif (South Urals)). *Zapiski RMO*, 2014, V. 143, No. 3, pp. 105—114.
37. Shafranovsky G. I. (1982) *Kristallomorfologiya grafita iz Ilmenskikh gor* (Crystallomorphology of graphite from the Ilmeny Mountains). *Mineralogicheskie issledovaniya endogennykh mestorozhdeniy Urala* (Mineralogical investigations of endogenic deposits of the Urals. Sverdlovsk). USCAS USSR, 1982, 44—53.
38. Shumilova T. G. *Nakhodkaalmazov i grafitopodobnogo veshchestva v karbonatitakh o. Fuerteventura, Ispaniya* (Finding of diamonds and graphite-like substance in carbonatites Fuerteventura Island, Spain). *Vestnik IG Komi SC UB RAS*, 2005, No. 10, pp. 17—18.
39. Shumilova T. G., Kovalchuk N. S., Mingalev A. N., Divaev F. K. *Izotopnyi sostav ugleroda i kisloroda karbonatov karbonatitov Kosyuskogo massiva (Srednyi Timan)* (Isotopic composition of carbon and oxygen carbonates of carbonatites of the Kosyu massif (Middle Timan)). *Vestnik IG Komi SC UB RAS*, 2012, No. 4, pp. 9—13.
40. Anovitz L. M., Essene E. J. Phase equilibria in the system $\text{CaCO}_3\text{--MgCO}_3\text{--FeCO}_3$. *Journal of Petrology*, 1987, V. 28, pp. 389—414.
41. Ashchepkov I. V., Pokhilenko N. P., Vladyskin N. V., Rotman A. Y., Afanasiev V. P., Logvinova A. M., Kostrovitsky S. I., Pokhilenko L. N., Karpenko M. A., Kuligin S. S., Malygina E. V., Stegnitsky Y. B., Alymova N. A., Khmelnikova O. S. Reconstruction of mantle sections beneath Yakutian kimberlite pipes using monomineral thermobarometry. In: Coltorty M. & Goire G. M. (eds.) *Metasomatism in Oceanic and Continental Lithospheric Mantle*, Geological Society, London, Special Publications, 2008, V. 293, pp. 335—352.
42. Djuraev A. D., Divaev F. K. Melanocratic carbonatites — new type of diamond-bearing rocks, Uzbekistan. *Mineral Deposits: Processed Processing*. Stanley et al. (eds.), Balkema, Rotterdam, 1999, V. 1, pp. 639—642.
43. Dunn S. R., Valley J. W. Calcite-graphite isotope thermometry: a test for polymetamorphism in marble, Tudor gabbro aureole, Ontario, Canada. *Journal of Metamorphic Geology*, 1992, V. 10, pp. 487—501.
44. Ellis D. J., Green D. H. An Experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1979, V. 71, pp. 13—22.
45. Hammarström J. M., Zen E.-A. Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer. *Amer. Miner.*, 1986, V. 71, No. 11/12, pp. 1297—1313.
46. Holland T., Blundy J. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1994, V. 116, pp. 433—447.
47. Horstmann U. E., Verwoerd W. J. Carbon and oxygen isotope variations in southern African carbonatites. *Journal of African Earth Sciences*, 1997, V. 25, No. 1, pp. 115—136.
48. Kitchen N. E., Valley J. W. Carbon isotope thermometry in marbles of the Adirondack Mountains, New York. *Journal of Metamorphic Geology*, 1995, V. 13, pp. 577—594.
49. Kerrich R. W. Geochemical evidence on the source of fluids and solutions for shear zone hosted mesothermal Au deposits. *Mineralization in Shear Zones*. J. T. Bursnal (Ed.). Geological Association of Canada. Short Course Notes, 1989, No. 6, pp. 129—197.
50. Kueter N., Lilley M. D., Schmidt M. W., Bernasconi S. M. Experimental carbonatite/graphite carbon isotope fractionation and carbonate/graphite geothermometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, V. 253, pp. 290—306.
51. Perchuk L. L. Derivation of thermodynamically consistent system of geothermometers and geobarometers for metamorphic and magmatic rocks. *Progress in metamorphic and magmatic petrology*. L. L. Perchuk (Ed.). Cambridge University Press, 1990, pp. 93—112.
52. Perchuk L. L., Lavrent'eva I. V. Some equilibria involving garnet, orthopyroxene and amphibole as geothermometers and geobarometers for metamorphic rocks. *Experiment-89*, Informative volume, Moscow, Nauka, 1990, pp. 44—45.
53. Peretyazhko I. S., Savina E. A., Khromova E. A. Minerals of the rhönite-kuratite series in paralavas from a new combustion metamorphic complex of Choir-Nyalga Basin (Central Mongolia): chemistry, mineral assemblages, and formation conditions. *Mineralogical Magazine*, 2017, V. 81, pp. 949—974.
54. Plyusnina L. P. Experimental study on metabasite equilibria, geothermometry. *Experiment in the solution of topical problems in geology*. Moscow, Nauka, 1986, pp. 174—183.
55. Powell R. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene geothermometer revised. *J. Metamorphic Geol.*, 1985, V. 3, No. 3, pp. 231—243.
56. Ray J. S., Ramesh R. Stable carbon and oxygen isotopic composition of Indian carbonatites. *International Geology Review*, 2006, V. 48, No. 1, pp. 17—45.
57. Schmidt M. W. Experimental calibration of the Al-in-hornblende geobarometer at 650 °C, 3.5—13.0 kbar. *Terra abstracts*, 1991, V. 3, No. 1, p. 30.
58. Srivastava R., Taylor L. A. Carbon- and oxygen-isotope variations in Indian carbonatites. *International Geology Review*, 1996, No. 5, pp. 419—429.
59. Valley J. W., O'Neil J. R. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ exchange between calcite and graphite: a possible thermometer in Grenville marbles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, V. 45, pp. 411—419.