



МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА, ПОИСКОВ,  
ОЦЕНКИ И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 552.23

## Изотопный состав кислорода–углерода и стронция в первичных карбонатитах мира: сводка данных и линейные тренды

Болонин А. В.

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва, Россия

**Аннотация.** Выполнен статистический регрессионный анализ сводки собранных из опубликованной литературы изотопных данных по 176 карбонатитовым проявлениям мира (всего 1829 парных значений  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  в первичных карбонатитах). В большинстве проявлений в значениях  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  выявлены отчётливые линейные тренды, аппроксимируемые на диаграммах векторами по формуле регрессии  $y = kx + b$ . Выделяются тренды трёх направлений. Доминирует тренд с угловым коэффициентом  $k$  в диапазоне  $0,0 \div +0,6$  и в среднем  $+0,31$  (прямая корреляция  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ ). В литературе его связывают с релеевским высокотемпературным фракционированием карбонатитовых расплавов или с их седиментационной коровой контаминацией. Второй тренд с  $k$  от  $0,0$  до  $-0,7$  (обратная корреляция  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ ) связывают с дегазацией  $\text{CO}_2$  из расплавов. Редок третий тренд с  $k$  от  $+0,6$  до  $+1,5$ . В остальных карбонатитовых проявлениях линейные тренды в значениях  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  не обнаруживаются. Это может быть следствием совместного действия разнонаправленных линейных трендов. В этой связи универсальным изотопным показателем для всех карбонатитовых проявлений принята начальная точка трендовых векторов. На диаграмме  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  в поле начальных точек околнурен бокс PC-90, включающий 90 % проявлений первичных карбонатитов. Координаты угловых точек бокса  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  ‰:  $(+5 \div -8)$ ,  $(+5 \div -5)$ ,  $(+5,5 \div -2,5)$ ,  $(+12 \div -2,5)$ ,  $(+12 \div -7)$ ,  $(+9 \div -8,5)$ . PC-90 по изотопному составу углерода подразделён на две части значением  $\delta^{13}\text{C} = -5,2$  ‰. Тем самым предполагаются разные по изотопному составу углерода глубинные источники. Корреляция в изотопном составе кислорода–углерода и стронция в карбонатитах не обнаруживается, что предполагает неоднородность глубинных источников также и по изотопному составу стронция.

**Ключевые слова:** карбонатиты, изотопы кислорода, углерода и стронция, линейные тренды.

Для цитирования: Болонин А. В. Изотопный состав кислорода–углерода и стронция в первичных карбонатитах мира: сводка данных и линейные тренды. Руды и металлы. 2024. № 3. С. 5-27. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10011.

## Oxygen–Carbon and Strontium Isotope Composition in Primary Carbonatites of the World: The Data Summary and Linear Trends

Bolonin A. V.

FSBI "Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals", Moscow, Russia

**Annotation.** A statistical regression analysis was performed of a summary of borrowed literary isotopic data on 176 carbonatite occurrences worldwide (a total of 1829 paired  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  values in primary carbonatites). For most of the occurrences, distinct linear trends in  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  values were revealed, approximated in diagrams by vectors using the regression formula  $y = kx + b$ . Trends in three directions are distinguished. The dominating trend possesses the angular coefficient  $k$  in the range of  $0.0 \div +0.6$ , averaging at  $+0.31$  (direct correlation  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ ). In the literature, it is associated with the Rayleigh high-temperature fractionation of carbonatite melts or with their sedimentary crustal contamination. The second trend with  $k$  from  $0.0$  to  $-0.7$  (inverse correlation  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ ) is associated with  $\text{CO}_2$  degassing from the melts. The third trend with  $k$  from  $+0.6$  to  $+1.5$  is rare. In other carbonatite occurrences, no linear trends in  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  values are detected. This may be a consequence of a combined action of the multidirectional linear trends. In this regard, the initial point of the trend vectors is accepted as a universal isotope indicator for all the carbonatite occurrences. In the  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  diagram, the box PC-90 is outlined in the field of the initial points, including 90 % of the primary carbonatite occurrences. The coordinates of the corner points of the box in  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  ‰ are  $(+5 \div -8)$ ,  $(+5 \div -5)$ ,  $(+5.5 \div -2.5)$ ,  $(+12 \div -2.5)$ ,  $(+12 \div -7)$ ,  $(+9 \div -8.5)$ . The box PC-90 is subdivided into two parts by the carbon isotope composition, using the value  $\delta^{13}\text{C} = -5.2$  ‰. This suggests that the deep sources differ in carbon isotope composition. No correlation is found in the oxygen–carbon and strontium isotope compositions in the carbonatites, which suggests that the deep sources are also heterogeneous in the strontium isotope composition.

**Keywords:** carbonatites; oxygen, carbon, and strontium isotopes; linear trends.

For citation: Bolonin A. V. Oxygen–Carbon and Strontium Isotope Composition in Primary Carbonatites of the World: The Data Summary and Linear Trends. Ores and metals, 2024, № 3, pp. 5–27. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10011.

**Введение.** По литературным источникам из 176 карбонатитовых проявлений мира собраны 1829 пар сопряжённых значений изотопного состава кислорода и углерода ( $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^{13}\text{C}$ ) в первичных карбонатитах. Выполнена статистическая обработка значений, включая линейный регрессионный анализ по формуле  $y = kx + b$ . Дополнительно собраны данные по изотопному составу стронция в тех же карбонатитовых проявлениях. Сводка изотопных данных публиковалась ранее [3]. Обновлённая сводка превосходит раннюю по количеству и полноте статистической обработки данных.

В сводку включены изотопные данные по пробам, которые авторы литературных источников классифицируют как первичные карбонатиты. Карбонатитовые проявления представляют собой объекты разных форм и размеров – комплексы, массивы, штоки, тела, дайки, фациальные зоны. Изотопные анализы выполнены по материалу карбонатных пород (сёвит, альвикит, бефорсит и др.), реже по монофракциям кальцита, доломита, анкерита, сидерита. Анализируемый материал в большинстве случаев классифицируется как первичные карбонатиты на основе петрографических наблюдений, которыми в породах не регистрируются заметные вторичные минеральные изменения эндогенного или экзогенного типа. К «вторичным карбонатитам» авторы относят гидротермально изменённые, перекристаллизованные, выветрелые, окисленные породы, а также сопутствующие гидротермальные карбонатные жилы, туфы, вторичный кальцит. В редких случаях к «вторичным карбонатитам» относят значения  $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^{13}\text{C}$ , значительно отклоняющиеся от диапазонов, типичных для первичных карбонатитов.

Изотопная сводка включает 176 карбонатитовых объектов, по которым имелись два и более парных значений  $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^{13}\text{C}$ . Из них 153 объекта входят в известный список из 527 карбонатитовых проявлений мира [8]. Этому списку в статье соответствуют названия проявлений и их идентификационные номера (ID). Сверх списка привлечены 23 дополнительных проявления. Лимитируемый объём статьи не позволяет представить полную базу данных

и список литературных источников (около 150 названий). Тем не менее по названиям и фамилиям, имеющимся в табличном приложении, большинство источников могут быть найдены в интернете.

На всех изотопных диаграммах горизонтальная ось  $x$  –  $\delta^{18}\text{O}$ , ‰ (V-SMOW), вертикальная ось  $y$  –  $\delta^{13}\text{C}$ , ‰ (V-PDB). Такое положение осей имеет значение при регрессионном анализе. На диаграммах на обеих осях длина 1 ‰ выдерживается одинаковой. Это позволяет визуально единообразно сравнивать форму полей точек и угол наклона трендовых линий на разных диаграммах. Лабораторная точность индивидуальных определений  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  не хуже 0,1–0,2 ‰. Для краткости изложения далее используются сокращения:  $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^{13}\text{C}$  – парные значения (точки на диаграмме) изотопного состава кислорода и углерода, КП – карбонатитовые проявления, PC – первичные карбонатиты (от Primary Carbonatites), линейное (нелинейное, изометрическое) КП – карбонатитовое проявление с линейной (нелинейной) взаимосвязью (без линейной взаимосвязи) значений  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$ , max–min  $\delta^{18}\text{O}$  и max–min  $\delta^{13}\text{C}$  – разность между максимальным и минимальным значениями в выборке.

**Сводные данные.** В изотопную сводку включены 1829 индивидуальных значений  $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^{13}\text{C}$ , классифицируемых авторами как первичные карбонатиты. Все точечные значения вынесены на диаграмме (рис. 1), где они заполняют обширное поле между мантийным значением  $\delta^{18}\text{O}$  около 5,0 ‰ и нормально-осадочными морскими карбонатами (NSC). На этом основана гипотеза широкой контаминации первичного мантийного карбонатитового источника коровым седиментационным материалом [1, 2].

Из тех же литературных источников попутно взяты 299 точечных значений, отнесённых авторами к «вторичным карбонатитам». На диаграмме эти точки занимают наиболее широкое поле. В целом оно смещено в направлении увеличения  $\delta^{18}\text{O}$  (утяжеления кислорода), в том числе в сторону гипергенных почвенных карбонатов (SC), образующихся под действием метеорных вод.

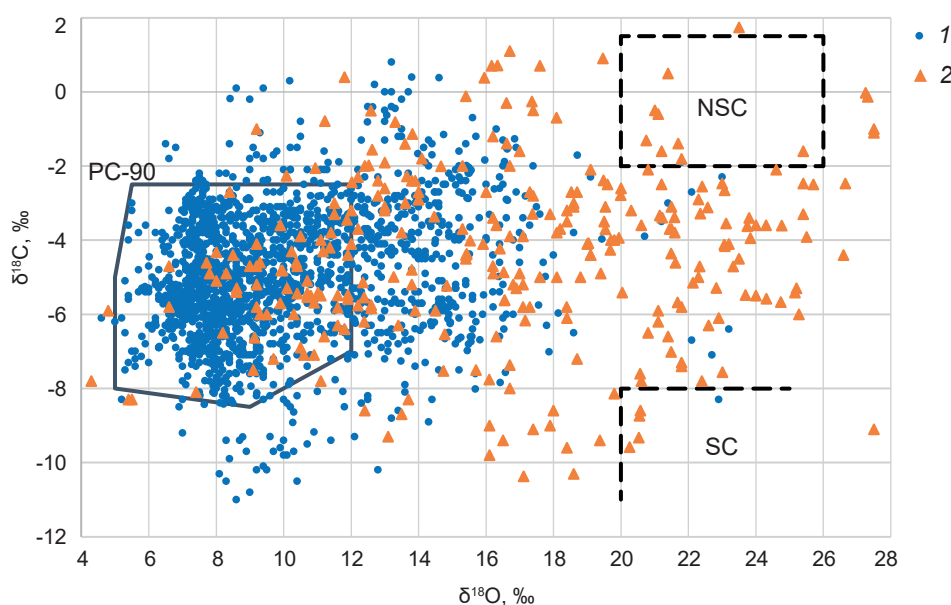
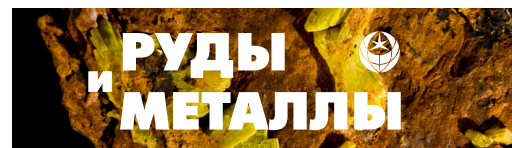


Рис. 1. Значения  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  в индивидуальных пробах карбонатитов мира:

1 – в первичных ( $n = 1829$ ) и 2 – вторичных ( $n = 299$ ) карбонатитах. NSC – нормально-осадочные морские карбонаты; SC – почвенные карбонаты [7]. Контур PC-90 обоснован на рис. 7

Fig. 1. The  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  values in individual samples of carbonatites from around the world:

1 – in primary carbonatites ( $n = 1829$ ) and 2 – in secondary carbonatites ( $n = 299$ ). NSC – marine normal sedimentary carbonates; SC – soil carbonates [7]. The PC-90 contour is based on Fig. 7

Более интересный результат даёт трендовый анализ изотопных данных в пределах отдельных КП. В рассматриваемых 176 объектах число точек  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  колеблется от 2 до 54. Трендовый анализ выполнен в 155 КП, в которых имеются три и более изотопных точек. Таблица с этими КП приведена в конце статьи. Для каждого из КП в программе Microsoft Excel 97-2003 построена точечная диаграмма и линия тренда (регрессии), рассчитаны уравнение регрессии  $y = kx + b$ , включающее угловой коэффициент  $k$  и постоянное число  $b$ , а также коэффициент детерминации (достоверности аппроксимации)  $R^2$ . Коэффициент  $R^2$  равен квадрату коэффициента парной корреляции и отражает степень линейной взаимосвязи значений: от полного её отсутствия ( $R^2 = 0$ ) до полной функциональной зависимости ( $R^2 = 1,0$ ). Примеры диаграмм приводятся на последующих рисунках. Линия тренда на диаграммах изображается как вектор, направленный

в сторону увеличения  $\delta^{18}\text{O}$ . В использованной литературе противоположное направление вектора, в сторону уменьшения  $\delta^{18}\text{O}$ , в рассматриваемых КП практически не допускается. Для каждого КП рассчитаны минимальное, максимальное и среднее значения  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$ , разности  $\text{max-min } \delta^{18}\text{O}$  и  $\text{max-min } \delta^{13}\text{C}$ , а также начальная точка линии тренда с координатами  $x = \min \delta^{18}\text{O}$  и  $y (\delta^{13}\text{C}) = kx + b$ .

Вначале построений была выбрана группа КП, удовлетворяющих двум «жестким» условиям – число проб в выборке не менее четырёх и разность между максимальным и минимальным значениями  $\text{max-min } \delta^{18}\text{O}$  более 2,0 ‰. Линейный тренд в выборке определялся по визуальному восприятию поля точек на диаграммах и значению коэффициента  $R^2$ . Примеры диаграмм в порядке увеличения  $R^2$  приведены на рисунке 2. В этом ряду линейная форма поля точек начинает визуально уверенно фиксироваться с проявления Четлас-



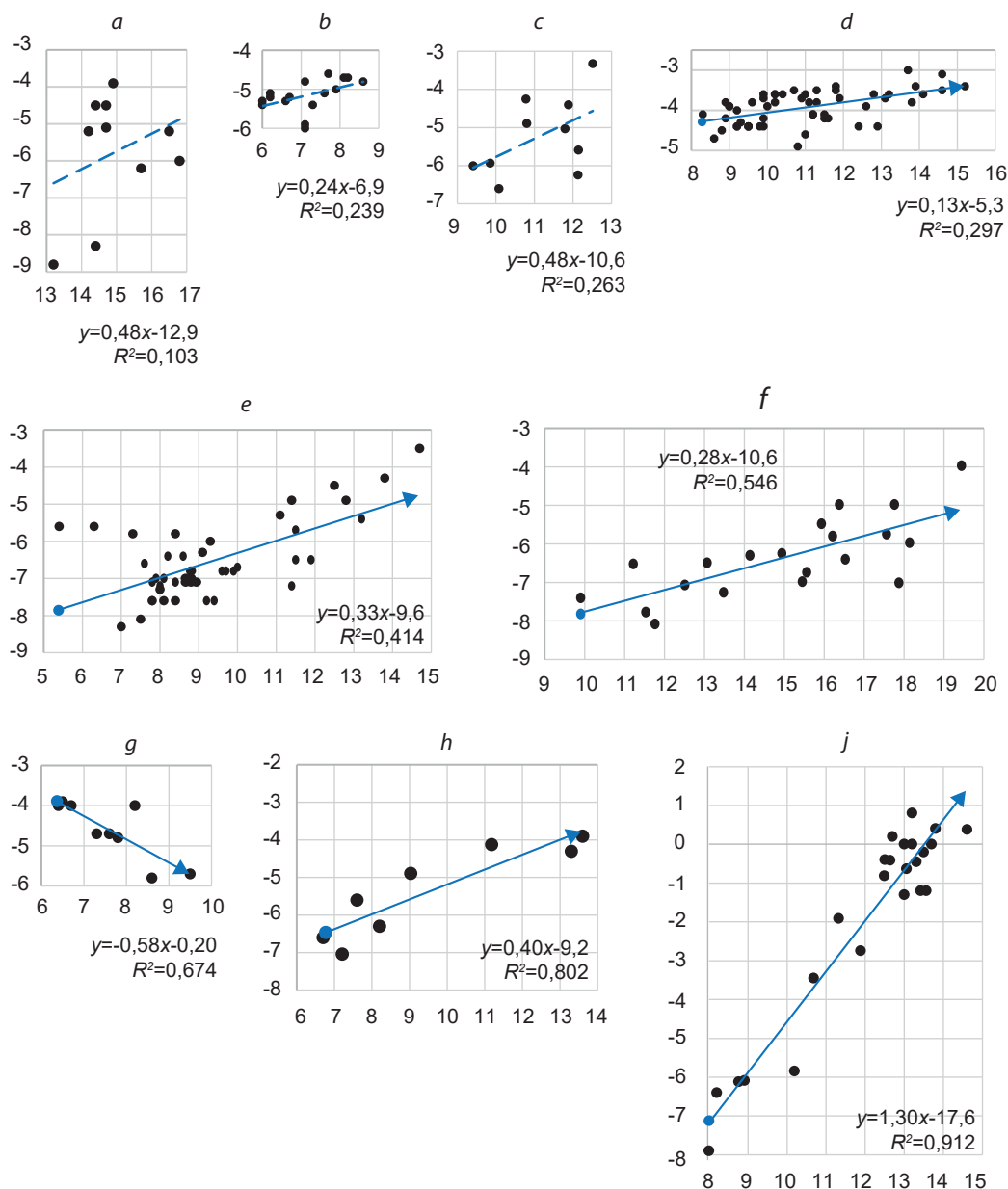


Рис. 2. Примеры трендового анализа парных значений  $\delta^{18}\text{O}$  ‰ (ось x) и  $\delta^{13}\text{C}$  ‰ (ось y) в группе КП с max–min  $\delta^{18}\text{O}$  более 2,0 ‰ (в скобках здесь и далее ID):

a – Зандкопсдрифт (122), b – Глейбат-Лафуд, c – Майоа (337), d – Четласский (413), e – Тапира (299), f – Чиригуэло (310), g – Ваджилитаг (318), h – Баилундо (5), i – Мато-Прето (306). Синий вектор – линия регрессии с начальной точкой. КП расположены в порядке увеличения коэффициента  $R^2$

Fig. 2. Examples of the trend analysis of the paired values  $\delta^{18}\text{O}$  ‰ (x-axis) and  $\delta^{13}\text{C}$  ‰ (y-axis) in the group of carbonatite occurrences with the difference max–min  $\delta^{18}\text{O}$  of more than 2.0 ‰ (in brackets here and below – ID):

a – Zandkopsdrift (122), b – Gleibat-Lafhouda, c – Miayoa (337), d – Chetlassky (413), e – Tapira (299), f – Chiriguélo (310), g – Wajilitage (318), h – Bailundo (5), i – Mato Preto (306). The blue vector is the regression line with the starting point. The carbonatite occurrences are arranged in order of increasing the coefficient  $R^2$

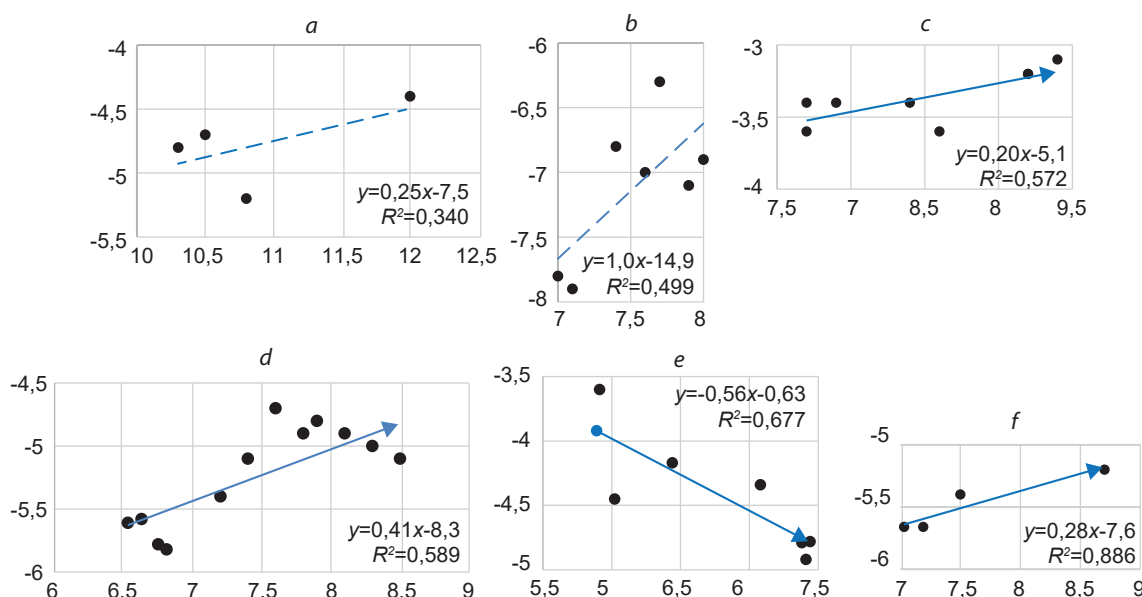
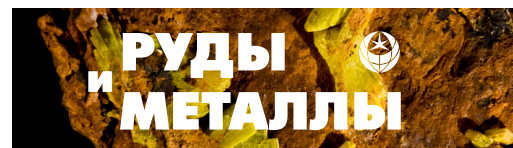


Рис. 3. Примеры трендового анализа значений  $\delta^{18}\text{O}$  ‰ (ось x) и  $\delta^{13}\text{C}$  ‰ (ось y) в группе КП с разностью max–min  $\delta^{18}\text{O}$  от 1,0 до 2,0 ‰:

a – Волтуре, b – Вишневогорский (414), c – Хома-Маунтин (33), d – Матонго (16), e – Лайваййоки (489), f – Магнет-Ков (282). КП расположены в порядке увеличения коэффициента  $R^2$

Fig. 3. Examples of the trend analysis of the values  $\delta^{18}\text{O}$  ‰ (x-axis) and  $\delta^{13}\text{C}$  ‰ (y-axis) in the group of carbonatite occurrences with the difference max–min  $\delta^{18}\text{O}$  from 1.0 to 2.0 ‰:

a – Vulture, b – Vishnevogorsky (414), c – Homa Mountain (33), d – Matongo (16), e – Laivajoki (489), f – Magnet Cove (282). The carbonatite occurrences are arranged in order of increasing the coefficient  $R^2$

ский ( $R^2 = 0,30$ ) (см. рис. 2, d). Это значение соответствует коэффициенту парной корреляции 0,55, который в статистике характеризует начало отчётливой линейной взаимосвязи. Таким способом рассчитанный линейный тренд устанавливается в 57 КП, имеющих  $R^2$  от 0,30 до 0,99.

В группе КП с разностью max–min  $\delta^{18}\text{O}$  от 1,0 до 2,0 ‰ также можно выделить достоверно линейные КП путём повышения порога минимального  $R^2$ . На рисунке 3 в ряду КП в порядке увеличения  $R^2$  отчётливый линейный тренд фиксируется у КП с  $R^2$  более 0,50 (соответствует коэффициенту парной корреляции более 0,71). В эту группу попадают 7 КП.

Наряду с отчётливо линейными КП ( $R^2$  более 0,30) линейная форма поля точек видна у некоторых КП с  $R^2$  менее 0,30. Такие КП проявляют визуальную линейность за счёт большой растянутости точек вдоль оси  $\delta^{18}\text{O}$  (рис. 4). Мерой растянутости может служить отноше-

ние разностей max–min  $\delta^{18}\text{O}$  / max–min  $\delta^{13}\text{C}$ . При отношении более 2,75 такие КП на диаграммах кажутся линейными (всего 19 объектов).

Есть примеры КП, в которых отсутствие линейности можно объяснить совмещением двух разнонаправленных трендов (рис. 5, a). Совместное действие трендов приводит прежде всего к увеличению дисперсии  $\delta^{13}\text{C}$ , что «размывает» общее поле точек с потерей линейности. Вместе с тем, среди КП с широким диапазоном  $\delta^{18}\text{O}$  есть примеры, где их линейность достигается включением в выборку удалённых по оси  $\delta^{18}\text{O}$  точек (см. рис. 5, b). Не исключено, что удалённые точки принадлежат «вторичным карбонатитам», в которых эпигенетические изменения не были зарегистрированы при петрографическом изучении.

Рассмотренные выше линейные КП в базе данных представлены 83 объектами (57 + 7 + 19). Остальные 72 КП, не удовлетворяю-

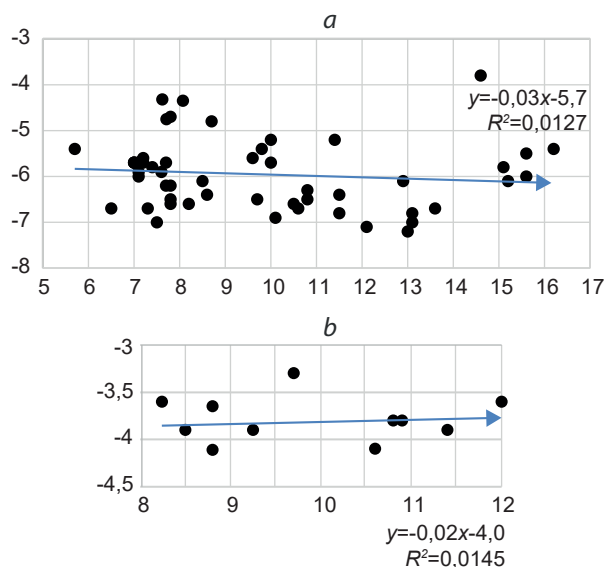


Рис. 4. Примеры визуально линейных КП с  $R^2$  менее 0,30. Отношение  $\max\text{--}\min \delta^{18}\text{O} / \max\text{--}\min \delta^{13}\text{C}$ :

$a$  – Кайзерштуль (499) – 3,09,  $b$  – Циганбулак – 4,64

Fig. 4. Examples of visually linear carbonatite occurrences with  $R^2$  less than 0.30. The ratio  $\max\text{--}\min \delta^{18}\text{O} / \max\text{--}\min \delta^{13}\text{C}$ :

$a$  – Kaiserstuhl – 3,09,  $b$  – Qieganbulake – 4,64

щие вышеизложенным критериям линейности, можно отнести к группе нелинейных, то есть без выраженной линейной взаимосвязи индивидуальных значений  $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^{13}\text{C}$ . Нелинейные КП по форме полей точек можно подразделить на изометрические (32 объекта) и остальные промежуточные (переходные к линейным). Мерой изометричности может служить отношение разностей  $\max\text{--}\min \delta^{18}\text{O} / \max\text{--}\min \delta^{13}\text{C}$ . В изометрических КП оно менее 1,9 (рис. 6).

Изометрические КП имеют меньший, чем линейные, но довольно широкий диапазон разностей:  $\max\text{--}\min \delta^{18}\text{O}$  от 1,0 до 9,6 ‰ и  $\max\text{--}\min \delta^{13}\text{C}$  от 0,7 до 5,4 ‰. Крайними примерами могут служить проявления Ока и Амба-Донгар (см. рис. 6,  $b$ ,  $e$ ). Для изометрических КП характеристической является средняя точка со среднеарифметическими значениями  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$ . Отклонения от неё в разные стороны до некоторого предела являются статистически случайными. Но можно предположить, что широкие диапазоны ( $\max\text{--}\min \delta^{18}\text{O}$  более

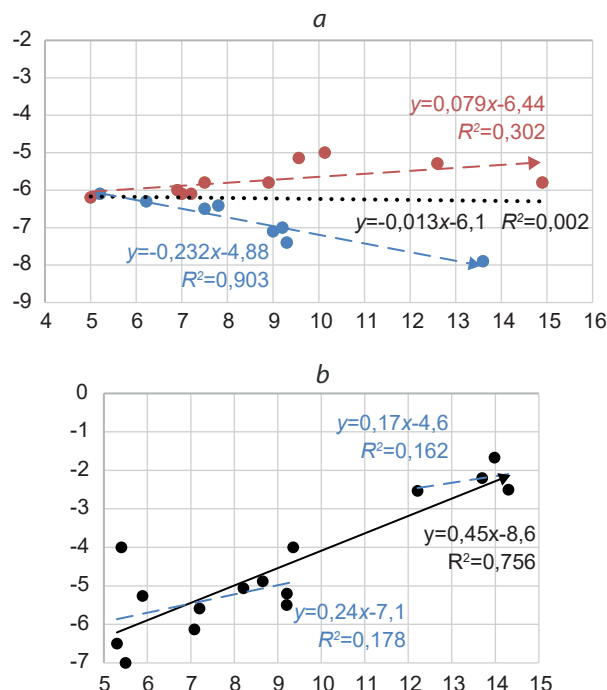


Рис. 5. Примеры совмещения разных трендов  $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^{13}\text{C}$  в КП:

$a$  – пример в целом нелинейного КП Ошурково (448) ( $R^2 = 0,002$ ), в котором совмещены два разных линейных тренда с  $R^2$  0,302 и 0,903;  $b$  – пример линейного КП Монте-Верде (6) ( $R^2 = 0,756$ ), который приобрёл линейность за счёт удалённых по оси  $\delta^{18}\text{O}$  точек ( $R^2 = 0,162$ )

Fig. 5. Examples of combining different  $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^{13}\text{C}$  trends in carbonatite occurrences:

$a$  – an example of a generally nonlinear Oshurkovo (448) carbonatite occurrence ( $R^2 = 0,002$ ), in which two different linear trends with  $R^2$  0,302 and 0,903 are combined;  $b$  – an example of a linear Monte Verde (6) carbonatite occurrence ( $R^2 = 0,756$ ), that has acquired the linearity due to remote points along the  $\delta^{18}\text{O}$  axis ( $R^2 = 0,162$ )

4–5 ‰) обусловлены смешением разнонаправленных линейных трендов, как это показано на рис. 5,  $a$ . Ситуация со смешением трендов более подробно смоделирована в [3]. В выборках изометрических КП формально также может быть вычислена начальная точка векторов. Она мало отличима от точки с минимальным значением  $\min \delta^{18}\text{O}$  и средним значением  $\text{aver } \delta^{13}\text{C}$  (см. рис. 6).

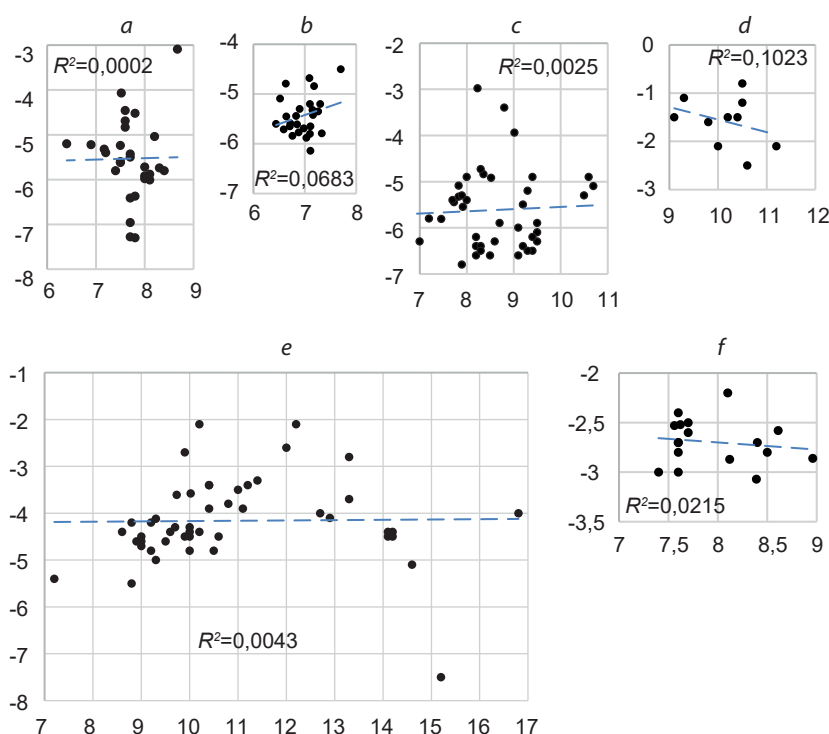
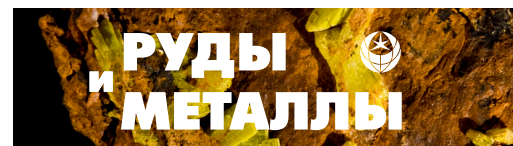


Рис. 6. Примеры изометрических КП:

отношение  $\text{max-min } \delta^{18}\text{O} / \text{max-min } \delta^{13}\text{C}$ : *a* – Альнё (515) – 0,54, *b* – Ока (230) – 0,77, *c* – Тамазерт (64) – 0,98, *d* – Весёлое (450) – 1,24, *e* – Амба-Донгар (356) – 1,78, *f* – Турий Мыс (406) – 1,79

Fig. 6. Examples of isometric carbonatite occurrences:

Ratio  $\text{max-min } \delta^{18}\text{O} / \text{max-min } \delta^{13}\text{C}$ : *a* – Alnö (515) – 0,54, *b* – Oka (230) – 0,77, *c* – Tamazert (64) – 0,98, *d* – Veseloe (450) – 1,24, *e* – Amba-Dongar (356) – 1,78, *f* – Turiy Mys (406) – 1,79

Преобладающее распространение в изотопной системе  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  отчётливо линейных КП и вероятность потери линейности в изометрических КП в результате смещения разных трендов – оба фактора позволяют применить в качестве характеристической начальную точку трендов для всего множества КП. Начальные и средние точки в 155 КП отображены на диаграмме (рис. 7). Начальные точки относительно средних смещены влево. Следует также заметить, что начальная точка некоторых КП может быть смещена на диаграмме влево в случае появления при дальнейшем изучении дополнительных изотопных значений с наименьшим  $\delta^{18}\text{O}$ . На диаграмме очерчен полигональный контур – бокс *PC-90*, включающий 90 % начальных точек. Координаты его

угловых точек  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  ‰: (+5÷-8), (+5÷-5), (+5,5÷-2,5), (+12÷-2,5), (+12÷-7), (+9÷-8,5). Своим левым краем бокс совпадает с первичным мантийным значением  $\delta^{18}\text{O}$  около 5 ‰, определяемым по изотопии перидотитов и океанических базальтов [4]. *PC-90* шире бокса первичного изверженного карбонатита – *PIC* [5] и значительно удалён от боксов нормально-осадочных морских и почвенных карбонатов. Бокс *PC-90* можно воспринимать как «обычный» для начальных точек  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  в первичных карбонатитах. За его пределы выходят немногочисленные объекты, для которых желателен поиск причин отклонения от «обычных» значений.

На диаграмме (рис. 8, *a*) вынесены начальные точки и линии трендов для 64 отчётли-

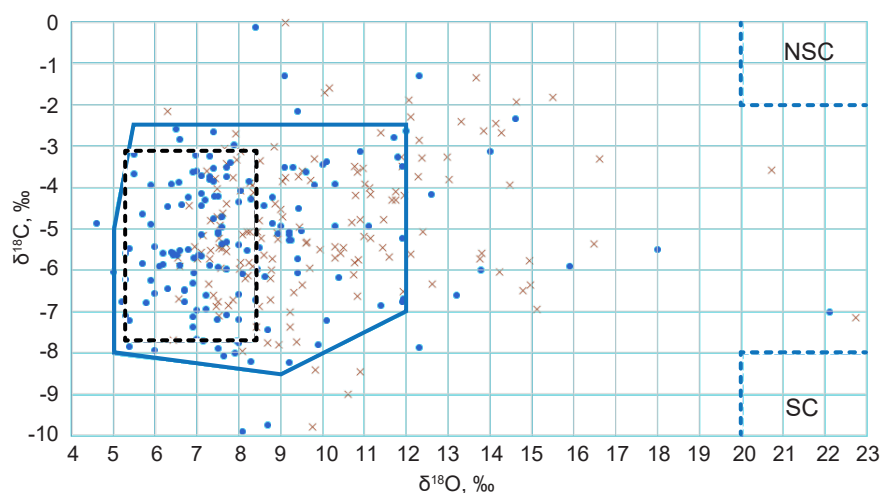


Рис. 7. Средние точки  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  (крестики) и начальные точки трендов (кружки) в 155 проявлениях первичных карбонатитов [5]:

полигональный синий контур PC-90 охватывает 90 % начальных точек; штриховой чёрный контур – первичные изверженные карбонатиты [5]; NSC – нормально-осадочные морские карбонаты; SC – почвенные карбонаты

Fig. 7. Mean points of  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  (crosses) and initial points of the trends (circles) in 155 occurrences of primary carbonatites [5]:

The polygonal blue contour PC-90 embraces 90 % of the initial points; the dashed black contour – primary igneous carbonatites [5]; NSC – marine normal-sedimentary carbonates; SC – soil carbonates

во линейных КП. На диаграмме просматриваются три направления трендов. Они также выделяются при статистическом анализе углового коэффициента  $k$  (см. рис. 8, *b*). Коэффициент  $k$  изменяется в широком диапазоне от -0,7 до +1,5, в котором с долей условности считаются три отдельных интервала. На диаграмме интервалы показаны в форме секторов, а векторами – средние интервальные значения. Резко доминирует сектор  $k$  в диапазоне 0,0÷+0,6 (средний вектор +0,31). Подчинённое распространение имеют сектор 0,0÷-0,7 и сектор +0,6÷+1,5.

Бокс PC-90 по визуальному восприятию на диаграмме (см. рис. 8, *a*) можно подразделить по вертикали на две части по значению -5,2 ‰  $\delta^{13}\text{C}$ . Такое разделение видится в левой части диаграммы в расположении линейных трендов и начальных точек. Аргументом в пользу такого разделения может служить и тот факт, что начальные точки проявлений,

находящихся в одном регионе, часто располагаются на диаграмме в одной её части – верхней или нижней (рис. 9). Впрочем, есть и располагающиеся в обеих частях (Индия-запад, Кольский). Различие по значению  $\delta^{13}\text{C}$  между двумя группами КП на региональном уровне может указывать на гетерогенность глубинных карбонатитовых источников по изотопному составу углерода.

Во многих КП присутствуют разные минеральные типы карбонатитов, формирующихся, как правило, в разные изверженные фазы или стадии. Наиболее распространены кальцитовые и доломитовые карбонатиты, редки анкеритовые и сидеритовые. На диаграммах приведены примеры разного изотопного соотношения двух типов карбонатитов (рис. 10, см. подписи). В целом доминирует тенденция увеличения  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  в доломитовых и сидеритовых карбонатитах по сравнению с кальцитовыми.



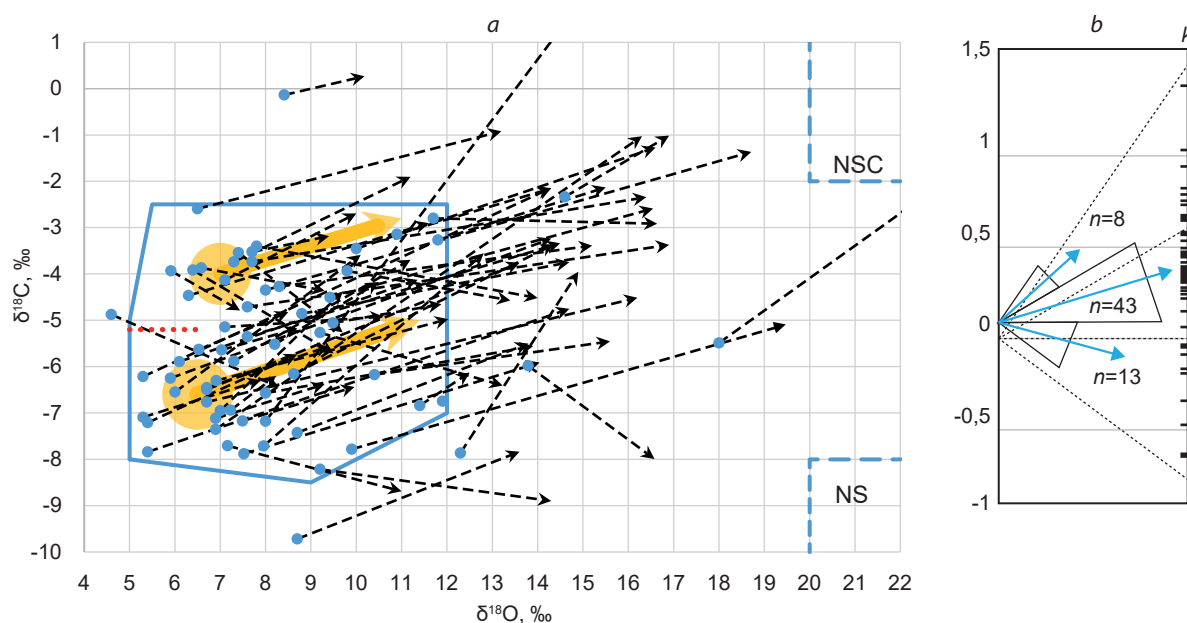
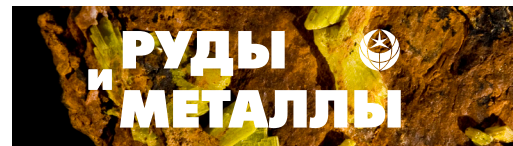


Рис. 8. Начальные точки  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  и линии тренда в отчётливо линейных КП:

*a* – линии тренда  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  (чёрные векторы) и их начальные точки (синие) в 64 первичных карбонатитовых проявлениях мира. Бокс PC-90 (синий контур) подразделён на две части значением  $-5,2$  ‰  $\delta^{13}\text{C}$  (красный пунктир); жёлтые стрелки – предполагаемые два центра начальных точек и исходящие из них векторы; *b* – диаграмма углового коэффициента  $k$  в уравнении регрессии  $y = kx + b$ . Раздельно показаны интервалы  $k$ :  $0,0 \div -0,7$  (среднее  $-0,29$  из  $n = 13$ );  $0,0 \div 0,6$  (среднее  $+0,31$  из  $n = 43$ );  $0,6 \div 1,5$  (среднее  $+0,9$  из  $n = 8$ )

Fig. 8.  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  starting points and trend lines in distinctly linear carbonatite occurrences:

*a* – the  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  trend lines (black vectors) and their initial points (blue) in 64 primary carbonatite occurrences worldwide. The box PC-90 (blue contour) is subdivided into two portions by the value of  $\delta^{13}\text{C}$   $-5.2$  ‰ (red dotted line); yellow arrows – two assumed centers of initial points and vectors emanating from them; *b* – diagram of the angular coefficient  $k$  in the regression equation  $y = kx + b$ . The following intervals of  $k$  are shown separately:  $0.0 \div -0.7$  (average  $-0.29$  of  $n = 13$ );  $0.0 \div 0.6$  (average  $+0.31$  of  $n = 43$ );  $0.6 \div 1.5$  (average  $+0.9$  of  $n = 8$ )

В использованных литературных источниках содержатся также данные по изотопному составу стронция в карбонатитах. Данные по 99 карбонатитовым проявлениям вынесены на диаграмме (рис. 11) и в прилагаемой таблице. Использованы минимальное начальное значение  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  и минимальное начальное значение  $\min \delta^{18}\text{O}$ . Из диаграммы видно, что корреляция между значениями не обнаруживается. Нет корреляции и в паре  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $\delta^{13}\text{C}$  (диаграмма не приводится). Наклонная линия на диаграмме – это линия смещения мантийного источника ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,702$  и

$\delta^{18}\text{O} = 5$  ‰) и седиментационного контаминанта ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,710$  и  $\delta^{18}\text{O} = 20$  ‰) при условии равной концентрации стронция в обоих источниках. Известно, что карбонатиты в большинстве случаев обогащены стронцием по сравнению с осадочными карбонатами. При таком условии полоса точек выше линии смешения на диаграмме может отражать седиментационную коровую контаминацию магм [2]. Однако широкий разброс точек ниже линии оставляет место для других гипотез, включая гетерогенность первичного источника по изотопному составу стронция на уровне

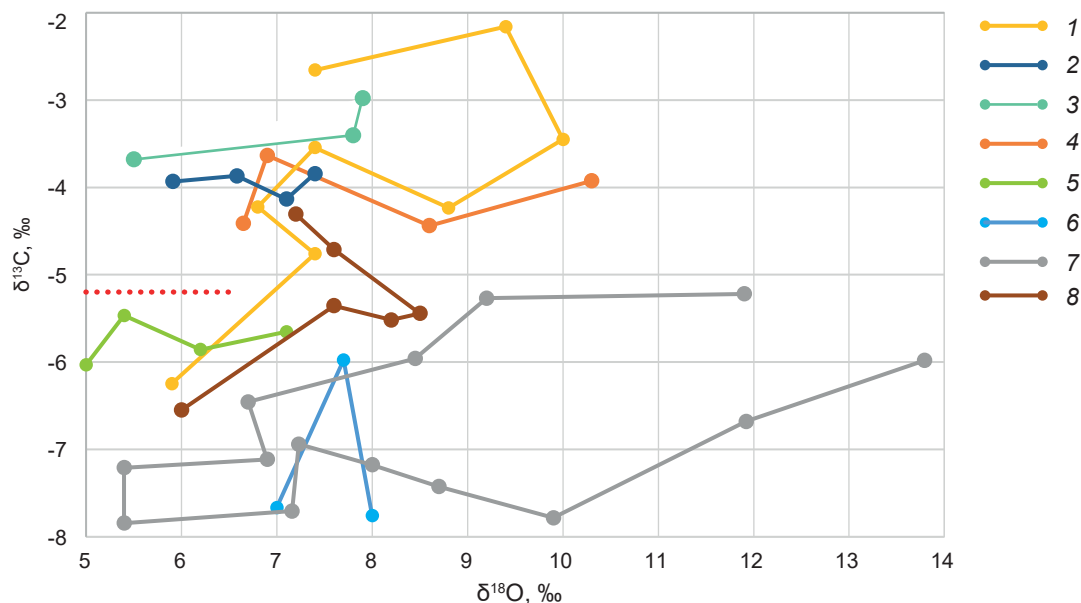


Рис. 9. Начальные точки  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  в карбонатитовых проявлениях в разных регионах мира (красным пунктиром проявления подразделены на две части по значению  $-5,2\text{‰}$   $\delta^{13}\text{C}$ ):

1 – Кольский – Хибинь, Озёрная Варака, Телячий Остров, Турий мыс, Ковдор, Салланлатви, Вуориярви, Тикшеозеро; 2 – Финляндия – Сокли, Лайвайюки, Кортярви, Силинярви; 3 – Малави (Африка) – Канганкунде, Сонгве-Хилл, Чилва; 4 – Гренландия – Гардинер, Грендел-Ика, Какарсук, Игалико; 5 – Южная Сибирь – Жидой, Южное, Халюта, Ошурково; 6 – Урал – Вишневогорский, Потанино, Булдым; 7 – Южная Америка (Бразилия, Боливия, Парагвай) – Серро-Сапо, Чиараки, Ангиико-Диас, Каталан-II, Каталан-I, Салитри, Аракса, Тапира, Джукия, Якупиранга, Барра-Итапирапуа, Мато-Прето, Чиригуэло, Серра-Негра; 8 – Индия-запад – Сарну-Дандали, Мундвара, Невания, Сиривасан, Амба-Донгар, Амба-Донгар-дайка

Fig. 9. Initial points of  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  in carbonatite occurrences in various regions of the world (the occurrences are subdivided into two portions by the value  $\delta^{13}\text{C} -5,2\text{‰}$ , shown by the red dotted line):

1 – Kola region – Khibiny, Ozernaya Varaka, Telyachy Island, Turiy Mys, Kovdor, Sallanlatvi, Vuoriyarvi, Tiksheozero; 2 – Finland region – Sokli, Laivajoki, Kortejärvi, Siilinjärvi; 3 – Malawi region (Africa) – Kangankunde, Songwe Hill, Chilwa Island; 4 – Greenland region – Gardiner, Grennedal-Ika, Qaqarssuk, Igaliko; 5 – Southern Siberia region – Zhidoy, Yuzhnoye, Khaluta, Oshurkovo; 6 – Ural region – Vishnevogorsky, Potanino, Buldym; 7 – South America region (Brazil, Bolivia, Paraguay) – Cerro Sapo, Chiaracke, Angico dos Dias, Catalan II, Catalan I, Salitre, Araxa, Tapira, Juquia, Jacupiranga, Barra do Itapirapua, Mato Preto, Chiriguuelo, Serra Negra; 8 – India-West region – Sarnu-Dandali, Mundwara, Newania, Siriwasan, Amba-Dongar, Amba-Dongar-Dike

не мантии. Нижнее левое поле на диаграмме ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0,704$  и  $\delta^{18}\text{O} < 8,5\text{‰}$ ) можно считать «мантийным» в изотопной системе Sr–O.

**Заключение.** По 176 карбонатитовым проявлениям мира собраны данные по изотопному составу кислорода и углерода в первичных карбонатитах – всего 1829 парных значений  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ . По 155 проявлениям выполнен статистический анализ изотопных выборок по

формуле линейной регрессии  $y = kx + b$ . Линейные тренды обнаруживаются более чем в половине объектов, что видно на диаграммах в координатах  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  (‰). Трендовые векторы направлены в сторону увеличения  $\delta^{18}\text{O}$ . Векторы характеризуются начальной точкой, наклоном к оси  $x$  и коэффициентом детерминации  $R^2$ . Начальная точка имеет минимальное по выборке значение  $x = \min \delta^{18}\text{O}$  и значе-

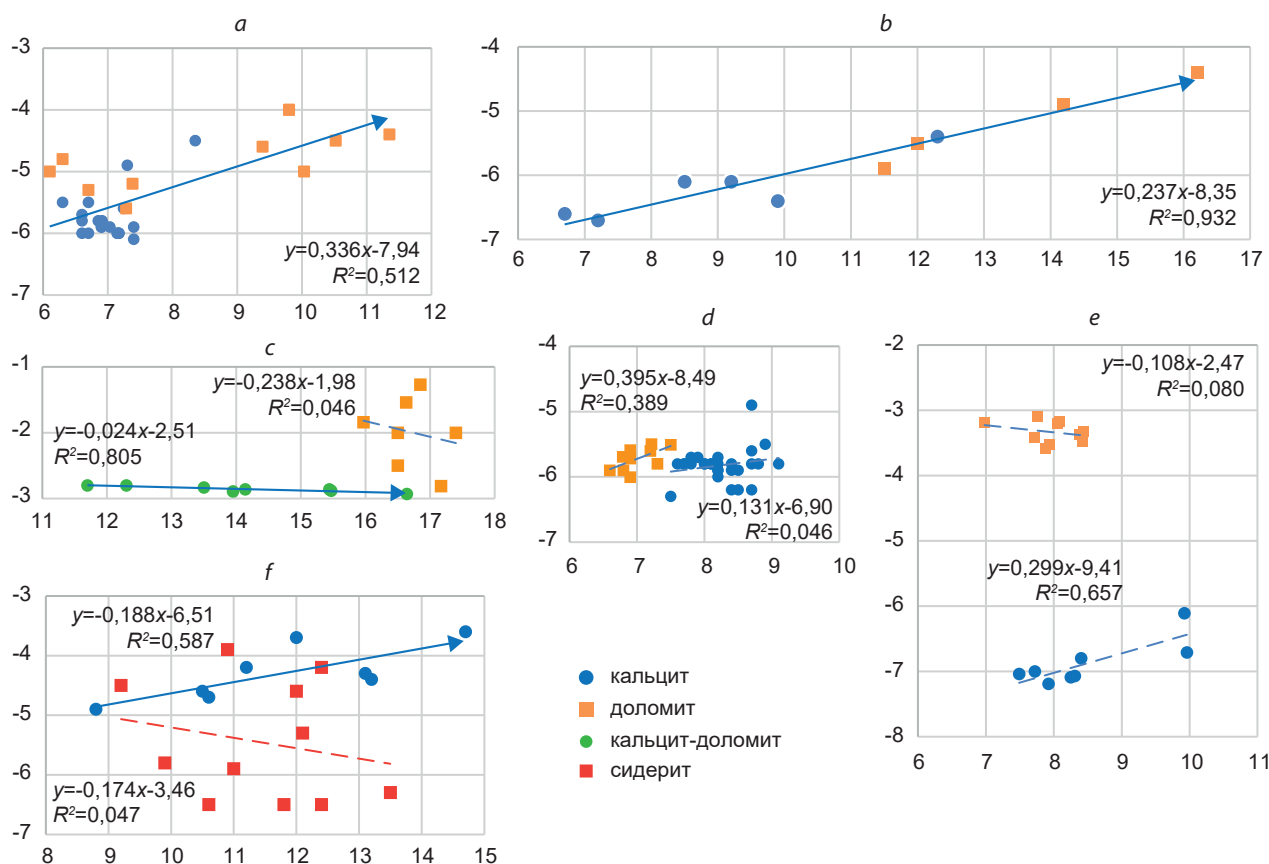
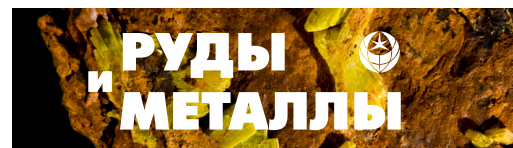


Рис. 10. Примеры разного соотношения кальцитовых и доломитовых карбонатитов на диаграмме  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ :

*a* – Белая Зима (Нижнесаянский) (439) – нелинейный кальцит и линейный доломит с близкой начальной точкой; *b* – Хааст-Ривер (484) – линейный доломит на продолжении линейного кальцита; *c* – Спитскоп (105) – нелинейный доломит на окончании линейного кальцита; *d* – Пакканаду (369) – доломит и кальцит различаются по  $\delta^{18}\text{O}$  при одинаковом  $\delta^{13}\text{C}$ ; *e* – Каотан – доломит и кальцит различаются по  $\delta^{13}\text{C}$  при одинаковом  $\delta^{18}\text{O}$ ; *f* – Карасуг – линейный кальцит и нелинейный сидерит с общей начальной точкой

Fig. 10. Examples of different ratios of calcite and dolomite carbonatites on the  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  diagram:

*a* – Belaya Zima (Nizhnesayansky) (439) – nonlinear calcite and linear dolomite with the closely spaced starting points; *b* – Haast River (484) – linear dolomite on the continuation of linear calcite; *c* – Spitskop (105) – nonlinear dolomite at the ending of linear calcite; *d* – Pakkanadu (369) – dolomite and calcite differ in  $\delta^{18}\text{O}$  with the same  $\delta^{13}\text{C}$ ; *e* – Caotan – dolomite and calcite differ in  $\delta^{13}\text{C}$  with the same  $\delta^{18}\text{O}$ ; *f* – Karasug – linear calcite and nonlinear siderite with the common starting point

ние  $y = \delta^{13}\text{C}$ , вычисляемое из формулы регрессии. Наклон вектора определяется угловым коэффициентом  $k$ , а коэффициент  $R^2$  определяет силу взаимосвязи значений.

Угловым коэффициентом  $k$  варьируется в широком диапазоне от -0,7 до +1,5, в котором выделяются три трендовых направления. Доминирует тренд с  $k$  от 0,0 до +0,6, в среднем +0,31 (прямая корреляция  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ ). Размах линий тренда (разность  $\text{max-min } \delta^{18}\text{O}$ ) колеблется от 1,0 до 10,7 ‰, в среднем 4,6 ‰. В литературе [2, 4, 6] такой тренд принято объяснять действием двух совпадающих по направлению факторов – релеевским высокотемпературным

факторов – релеевским высокотемпературным

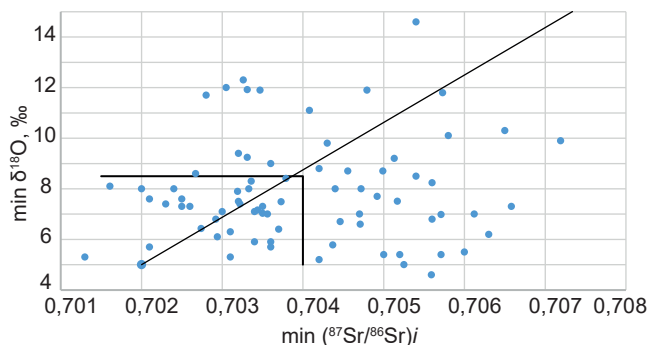


Рис. 11. Изотопный состав стронция и кислорода в карбонатитовых проявлениях мира

Fig. 11. Isotopic composition of strontium and oxygen in carbonatite occurrences of the world

фракционированием карбонатитовых расплавов и (или) седиментационной (коровой) контаминацией расплавов в промежуточных очагах. Второй тренд с коэффициентом  $k$  от 0,0 до -0,7 (обратная корреляция  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ ) менее распространён, его связывают с дегазацией  $\text{CO}_2$  из расплавов. Редок третий тренд с увеличенным коэффициентом  $k$  от +0,6 до +1,5 (прямая корреляция  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ ). Во всех трёх случаях увеличенные размахи трендов ( $\text{max-min } \delta^{18}\text{O}$  более 5–7 ‰) позволяют предполагать дополнительное воздействие на первичные карбонатиты не зафиксированных при петрографических наблюдениях вторичных процессов – флюидных, низкотемпературных гидротермальных, метаморфических, гипергенных.

У половины карбонатитовых проявлений линейные тренды  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  не отчётливы или отсутствуют (на диаграмме точки образуют поле изометрической формы). Это может быть следствием совместного действия разнонаправленных эндогенных факторов, например, высокотемпературного фракционирования и дегазации расплавов. Исходя из такого предположения, для проявлений без отчётливого линейного тренда  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  также можно вычислять начальную точку и принимать её как наиболее приближённую к первичному изотопному составу изверженных карбонатитов.

В поле начальных изотопных точек  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  на диаграммах околонуна бокс PC-90,

включающий 90 % проявлений первичных карбонатитов. Его можно принять как «обычный» для первичных карбонатитов, имеющих существенно глубинный источник вещества при минимальном или умеренном проявлении изотопного фракционирования или контаминации расплавов. За пределами бокса остаются редкие проявления, требующие углублённой петрографической аргументации их первичной природы. Бокс PC-90 имеет довольно отчётливые ограничения с трёх сторон значениями: слева +5,0 ‰  $\delta^{18}\text{O}$ , сверху -2,5 ‰  $\delta^{13}\text{C}$ , снизу -8,0 ‰  $\delta^{13}\text{C}$ . Граница справа +12,0 ‰  $\delta^{18}\text{O}$  является произвольной. PC-90 по вертикали подразделяется на две части по значению -5,2 ‰  $\delta^{13}\text{C}$ , тем самым предполагаются разные по изотопному составу углерода глубинные источники, что находит подтверждение в региональных различиях карбонатитовых проявлений.

Корреляция в изотопном составе кислорода и стронция в карбонатитах в целом не обнаруживается. Значения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  варьируются в широком диапазоне 0,701–0,707. Это предполагает неоднородность глубинных карбонатитовых источников по изотопии стронция, автономную от изотопной неоднородности по кислороду.

Изотопный состав кислорода, углерода и стронция в первичных карбонатитах мира рассмотрен на обширной статистической базе. Полученные данные подтверждают основные тенденции в изотопной эволюции карбонатитов, обсуждаемые в литературе. Вместе с тем остаётся возможность для дополнительных суждений и обобщений. Начальные точки линейных трендов в выборках карбонатитовых проявлений максимально приближены к первичному изотопному составу O и C, их можно использовать и при анализе изотопных данных по другим типам «мантийных» пород – кимберлитам, основным и щелочным породам. В целом широкие вариации в первичных карбонатитах начального изотопного состава C–O–Sr предполагают гетерогенность глубинных мантийных источников карбонатитовых магм и контаминацию их в промежуточных коровых очагах.



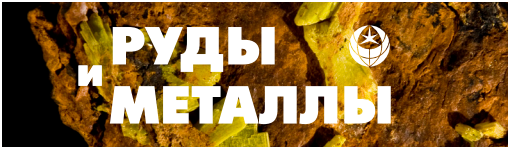
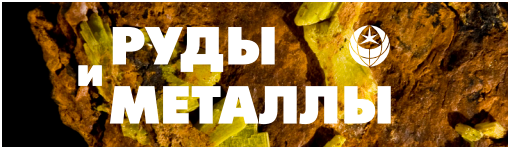


Таблица. Изотопный состав кислорода, углерода и стронция в первичных карбонатах мира  
Table. Isotopic composition of oxygen, carbon, and strontium in primary carbonates of the world

| ID     | Проявление       | Страна     | Литературный источник                                               | n  | k      | b      | R <sup>2</sup> | $\delta^{18}\text{O}$ min | $\delta^{18}\text{O}$ max | $\delta^{18}\text{O}$ aver | $\delta^{13}\text{C}$ min | $\delta^{13}\text{C}$ max | $\delta^{13}\text{C}$ aver | $\delta^{13}\text{C}$ initial | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ |
|--------|------------------|------------|---------------------------------------------------------------------|----|--------|--------|----------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 1      | 2                | 3          | 4                                                                   | 5  | 6      | 7      | 8              | 9                         | 10                        | 11                         | 12                        | 13                        | 14                         | 15                            | 16                              |
| 1      | InOuzzal         | Algeria    | Ouzegane et al., 1988                                               | 7  | 0,197  | -9,57  | 0,032          | 7,65                      | 10,27                     | 9,38                       | -8,92                     | -6,35                     | -7,72                      | -8,06                         |                                 |
| 3      | Catanda-Jango    | Angola     | Campeny et al., 2015                                                | 4  | 0,410  | -9,58  | 0,367          | 9,40                      | 10,40                     | 9,95                       | -6,00                     | -5,20                     | -5,50                      | -5,73                         |                                 |
| 5      | Bailundo         | Angola     | Pineau et al., 1973;<br>Alberti et al., 1999                        | 8  | 0,397  | -9,15  | 0,802          | 6,70                      | 13,60                     | 9,60                       | -7,04                     | -3,09                     | -5,34                      | -6,50                         |                                 |
| 6      | Monte Verde      | Angola     | Pineau et al., 1973;<br>Alberti et al., 1999                        | 15 | 0,452  | -8,61  | 0,756          | 5,30                      | 14,30                     | 9,01                       | -7,00                     | -1,67                     | -4,53                      | -6,21                         |                                 |
| 10, 11 | Tchivira-Bonga   | Angola     | Alberti et al., 1999                                                | 7  | 0,269  | -7,04  | 0,443          | 9,42                      | 16,55                     | 12,28                      | -5,31                     | -1,88                     | -3,74                      | -4,51                         |                                 |
| 15     | Lupongola        | Angola     | Alberti et al., 1999                                                | 10 | 0,302  | -10,16 | 0,474          | 7,52                      | 14,04                     | 9,23                       | -8,32                     | -6,27                     | -7,37                      | -7,88                         |                                 |
| 16     | Matongo          | Bourundi   | Dolenek 2015;<br>Decree et al., 2015                                | 13 | 0,410  | -8,30  | 0,589          | 6,53                      | 8,50                      | 7,54                       | -5,82                     | -4,70                     | -5,21                      | -5,63                         |                                 |
| 21     | Wadi Tarr        | Egypt      | Shimron, 1975                                                       | 3  | -0,731 | -2,96  | 0,321          | 5,20                      | 8,30                      | 6,43                       | -9,40                     | -5,30                     | -7,67                      | -6,76                         | 0,7042                          |
| 33     | Homa Mountain    | Kenya      | Dennis and Schrag, 2010                                             | 8  | 0,199  | -5,06  | 0,572          | 7,70                      | 9,40                      | 8,51                       | -3,60                     | -3,10                     | -3,36                      | -3,52                         |                                 |
| 34     | Buru             | Kenya      | Onuonga, 1997                                                       | 16 | 0,117  | -5,63  | 0,091          | 12,61                     | 16,10                     | 14,48                      | -4,39                     | -3,07                     | -3,94                      | -4,16                         |                                 |
| 39     | Kangankunde      | Malawi     | Dennis and Schrag, 2010; Nelson 1987;<br>Broom Fendley et al., 2017 | 9  | -0,372 | -1,63  | 0,136          | 5,50                      | 10,26                     | 8,49                       | -6,03                     | -2,30                     | -4,79                      | -3,68                         | 0,7016                          |
| 47     | Chilwa Island    | Malawi     | Simonetti and Bell, 1994                                            | 13 | 0,086  | -3,66  | 0,073          | 7,90                      | 14,15                     | 11,39                      | -3,27                     | -1,50                     | -2,68                      | -2,98                         | 0,7032                          |
| 51     | Songwe Hill      | Malawi     | Broom-Fendley et al., 2016                                          | 4  | -0,180 | -2,00  | 0,826          | 7,80                      | 14,00                     | 11,13                      | -4,60                     | -3,40                     | -4,00                      | -3,40                         |                                 |
| 64     | Tamazert         | Morocco    | Bouabdellah et al., 2010; Marks et al., 2009                        | 42 | 0,048  | -6,03  | 0,003          | 6,94                      | 10,70                     | 8,60                       | -6,80                     | -2,98                     | -5,62                      | -5,70                         | 0,7033                          |
|        | Gleibat Lafhouda | Morocco    | Bouabdellah et al., 2022                                            | 16 | 0,240  | -6,87  | 0,239          | 6,00                      | 8,60                      | 7,15                       | -6,00                     | -4,60                     | -5,16                      | -5,43                         | 0,7032                          |
| 73     | Xiluvo           | Mozambique | Melluso et al., 2004                                                | 3  | -0,101 | -4,34  | 1,000          | 7,50                      | 13,00                     | 9,63                       | -5,66                     | -5,10                     | -5,32                      | -5,10                         | 0,7032                          |
| 82     | Lofdal           | Namibia    | Vistorina Nandigolo, Do Cabo, 2013                                  | 3  | 0,272  | -7,32  | 0,901          | 6,43                      | 10,30                     | 8,08                       | -5,72                     | -4,58                     | -5,13                      | -5,57                         | 0,7027                          |

Продолжение таблицы

| 1   | 2                  | 3            | 4                                                                      | 5  | 6      | 7      | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16     |
|-----|--------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------|----|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 89  | Dicker Willem      | Namibia      | Reid and Cooper, 1992                                                  | 7  | 0,064  | -5,60  | 0,347 | 7,10  | 10,60 | 8,44  | -5,20 | -4,80 | -5,06 | -5,14 |        |
| 103 | Phalaborwa         | South Africa | Suwa et al., 1975                                                      | 4  | 0,219  | -5,84  | 0,232 | 8,05  | 10,20 | 9,06  | -4,28 | -3,10 | -3,85 | -4,07 | 0,7039 |
| 105 | Spitskop           | South Africa | Harmer 1999, Suwa et al., 1975                                         | 8  | -0,024 | -2,51  | 0,805 | 11,70 | 16,64 | 14,14 | -2,93 | -1,27 | -2,45 | -2,80 | 0,7028 |
| 109 | Kruidfonten        | South Africa | Clarke, 1989                                                           | 5  | 0,290  | -6,31  | 0,687 | 10,90 | 14,30 | 13,32 | -3,00 | -1,90 | -2,40 | -3,14 |        |
| 113 | Premier Mine       | South Africa | Suwa et al., 1975                                                      | 4  | 0,650  | -14,25 | 0,600 | 11,40 | 12,50 | 11,93 | -7,20 | -6,00 | -6,50 | -6,84 |        |
| 122 | Zandkopsdrift      | South Africa | Ogungbuy et al., 2015                                                  | 10 | 0,477  | -12,90 | 0,103 | 13,20 | 16,80 | 14,95 | -8,80 | -3,90 | -5,77 | -6,60 | 0,7033 |
| 126 | Oldoinyo Lengai    | Tanzania     | Bell and Keller 1995; Halama et al., 2007                              | 9  | -0,052 | -6,48  | 0,072 | 5,78  | 9,30  | 7,47  | -7,14 | -6,30 | -6,86 | -6,78 | 0,7044 |
| 127 | Kerimasi           | Tanzania     | Zaitsev et al., 2013                                                   | 3  | 0,235  | -5,95  | 0,989 | 7,43  | 12,77 | 9,43  | -4,27 | -2,96 | -3,73 | -4,20 |        |
| 142 | Panda Hill (Mbeya) | Tanzania     | Suwa et al., 1975; Dennis and Schrag, 2010; Dolenek, 2015              | 13 | 0,121  | -5,60  | 0,082 | 5,90  | 9,70  | 7,48  | -5,40 | -3,80 | -4,70 | -4,89 | 0,7034 |
| 146 | Fort Portal        | Uganda       | Deines and Gold, 1973; Benkó et al., 2021                              | 4  | -0,133 | -6,99  | 0,980 | 9,20  | 14,30 | 10,90 | -8,90 | -8,20 | -8,45 | -8,22 |        |
| 156 | Tororo             | Uganda       | Ackerman et al., 2021; Benkó et al., 2021; Dennis and Schrag, 2010     | 14 | 0,472  | -7,19  | 0,638 | 7,30  | 11,20 | 8,84  | -3,85 | -1,60 | -3,02 | -3,74 | 0,7025 |
| 157 | Sukulu             | Uganda       | Deines and Gold, 1973; Benkó et al., 2021; Ackerman et al., 2021       | 11 | 0,159  | -4,41  | 0,199 | 7,30  | 8,90  | 8,04  | -3,38 | -2,80 | -3,13 | -3,25 | 0,7026 |
| 173 | Aley               | Canada       | Mader, 1986; Chakhmouradian et al., 2015                               | 6  | 0,090  | -6,00  | 0,101 | 7,70  | 10,70 | 8,53  | -5,80 | -4,90 | -5,23 | -5,31 |        |
| 176 | Wicheeda           | Canada       | Trofanenko, 2014                                                       | 22 | 0,259  | -8,09  | 0,832 | 6,91  | 12,03 | 10,30 | -6,31 | -4,66 | -5,42 | -6,30 |        |
| 177 | Howard Creek       | Canada       | Çimena et al., 2019                                                    | 8  | 0,268  | -7,50  | 0,220 | 8,94  | 10,54 | 9,46  | -5,37 | -4,52 | -4,96 | -5,10 | 0,7026 |
| 191 | Eden Lake          | Canada       | Chakhmouradian et al., 2008                                            | 9  | 0,246  | -9,95  | 0,010 | 7,91  | 8,34  | 8,08  | -8,42 | -7,20 | -7,96 | -8,00 |        |
| 230 | Oka                | Canada       | Dennis and Schrag, 2010; Chen and Simonetti, 2015; Haynes et al., 2003 | 26 | 0,359  | -7,94  | 0,068 | 6,44  | 7,70  | 6,96  | -6,14 | -4,50 | -5,43 | -5,63 | 0,7032 |



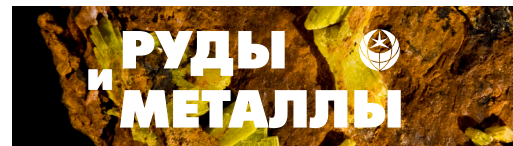
Продолжение таблицы

| 1   | 2                             | 3         | 4                                                                                       | 5  | 6      | 7      | 8     | 9     | 10    | 11    | 12     | 13    | 14    | 15    | 16     |
|-----|-------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|
| 243 | Aillik Bay                    | Canada    | Tappe et al., 2006                                                                      | 14 | 0,004  | -3,67  | 0,000 | 9,60  | 13,20 | 10,83 | -4,80  | -2,70 | -3,63 | -3,63 | 0,7039 |
| 249 | Gardiner                      | Greenland | Nielsen and Buchardt, 1985                                                              | 3  | 0,587  | -9,97  | 0,935 | 10,30 | 12,00 | 10,97 | -3,90  | -2,90 | -3,53 | -3,93 |        |
| 257 | Grcnnedal-Ika                 | Greenland | Pearc, 1997;<br>Coulsonetal, 2003;<br>Halama et al., 2005                               | 18 | 0,011  | -4,48  | 0,000 | 6,65  | 8,61  | 7,70  | -5,03  | -3,90 | -4,40 | -4,41 | 0,7029 |
| 258 | Qaqarssuk                     | Greenland | Knudsen and Buchardt, 1991                                                              | 16 | 0,249  | -5,35  | 0,219 | 6,90  | 10,39 | 7,71  | -4,68  | -2,74 | -3,43 | -3,64 |        |
| 260 | Igaliko                       | Greenland | Coulsonetal, 2003                                                                       | 9  | 0,142  | -5,66  | 0,276 | 8,60  | 19,10 | 13,02 | -5,50  | -2,30 | -3,81 | -4,44 | 0,7027 |
| 263 | Bearpaw Mountains (Rocky Boy) | USA       | Dennis and Schrag, 2010                                                                 | 8  | 1,125  | -17,53 | 0,807 | 8,30  | 9,00  | 8,70  | -8,30  | -7,40 | -7,74 | -8,19 |        |
| 265 | Bear Lodge (Bull Hill)        | USA       | Moore, 2014                                                                             | 15 | 0,385  | -13,07 | 0,313 | 8,70  | 13,60 | 10,62 | -10,20 | -6,90 | -8,98 | -9,72 | 0,7046 |
| 272 | Wet Mountains                 | USA       | Armbrustmacher, 1979                                                                    | 4  | 0,015  | -4,53  | 0,001 | 7,10  | 10,00 | 8,88  | -4,90  | -3,20 | -4,40 | -4,43 |        |
| 275 | Iron Hill                     | USA       | Jones et al., 2013;<br>Bczertschi, 1957;<br>Hugh et al., 1966;<br>Ackerman et al., 2021 | 4  | 0,561  | -9,98  | 0,960 | 7,30  | 11,20 | 9,05  | -5,90  | -3,40 | -4,70 | -5,88 | 0,7035 |
| 282 | Magnet Cove                   | USA       | Haynes et al., 2003; Nelson, 1987; Dennis, 2010                                         | 4  | 0,278  | -7,60  | 0,886 | 7,03  | 8,70  | 7,61  | -5,66  | -5,20 | -5,48 | -5,64 | 0,7035 |
| 285 | Cerro Sapo                    | Bolivia   | Schultz, 2004                                                                           | 4  | -0,256 | -5,88  | 0,496 | 7,16  | 11,00 | 9,84  | -9,18  | -7,67 | -8,39 | -7,71 | 0,7034 |
| 286 | Chiaracke                     | Bolivia   | Schultz, 2004                                                                           | 3  | -1,900 | 17,39  | 0,380 | 11,90 | 12,30 | 12,10 | -6,16  | -4,94 | -5,60 | -5,22 | 0,7035 |
| 289 | Angico dos Dias               | Brazil    | Antonini et al., 2003                                                                   | 16 | 0,071  | -7,52  | 0,032 | 11,92 | 15,82 | 14,78 | -7,09  | -5,70 | -6,48 | -6,68 | 0,7033 |
| 293 | Catalao II                    | Brazil    | Guarino et al., 2016                                                                    | 10 | -0,105 | -5,08  | 0,047 | 8,45  | 9,48  | 8,79  | -6,35  | -5,68 | -6,00 | -5,96 | 0,7050 |
| 294 | Catalao I                     | Brazil    | Cordeiro et al., 2010                                                                   | 5  | -0,282 | -2,67  | 0,864 | 9,20  | 13,23 | 10,86 | -6,60  | -5,37 | -5,74 | -5,27 | 0,7051 |
| 295 | Serra Negra                   | Brazil    | Speziale et al., 2020                                                                   | 4  | 0,744  | -12,32 | 0,529 | 7,23  | 8,23  | 7,50  | -7,35  | -6,18 | -6,75 | -6,94 |        |
| 296 | Salitre                       | Brazil    | Brod and Affonso, 1999                                                                  | 14 | 0,306  | -9,22  | 0,491 | 6,90  | 9,30  | 7,76  | -7,20  | -6,20 | -6,85 | -7,11 |        |

Продолжение таблицы

| 1   | 2                   | 3        | 4                                                                                                     | 5  | 6      | 7      | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16     |
|-----|---------------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 298 | Araxa               | Brazil   | Santos and Clayton, 1995; Speziale et al., 2020                                                       | 8  | 0,377  | -10,71 | 0,640 | 8,70  | 13,80 | 10,83 | -7,20 | -4,80 | -6,63 | -7,43 | 0,7050 |
| 299 | Tapira              | Brazil   | Brod and Affonso, 1999                                                                                | 45 | 0,332  | -9,64  | 0,414 | 5,40  | 14,70 | 9,32  | -8,30 | -3,50 | -6,54 | -7,84 | 0,7052 |
| 302 | Juquia              | Brazil   | Speziale et al., 2020                                                                                 | 8  | -0,720 | 3,94   | 0,778 | 13,79 | 16,58 | 15,12 | -8,02 | -5,82 | -6,94 | -5,98 |        |
| 303 | Jacupiranga         | Brazil   | Gomide et al., 2016; Comin-Chiaromonti et al., 2007; Haynes et al., 2003; Nelson, 1987                | 25 | 0,448  | -9,63  | 0,630 | 5,40  | 8,70  | 7,28  | -7,40 | -5,40 | -6,34 | -7,21 | 0,7050 |
| 305 | Barra do Itapirapua | Brazil   | Andrade et al., 1999                                                                                  | 9  | 0,332  | -8,68  | 0,785 | 6,70  | 9,40  | 8,34  | -6,40 | -5,40 | -5,91 | -6,46 | 0,7045 |
| 306 | Mato Preto          | Brazil   | Santos and Clayton, 1995; Andrade et al., 1999; Comin-Chiaromonti et al., 2001; Speziale et al., 2020 | 24 | 1,302  | -17,59 | 0,912 | 8,00  | 14,61 | 12,06 | -7,90 | 0,80  | -1,89 | -7,18 | 0,7047 |
|     | Morro Preto         | Brazil   | Nascimento et al., 2023                                                                               | 6  | 0,168  | -6,65  | 0,833 | 9,49  | 11,88 | 10,71 | -5,10 | -4,66 | -4,85 | -5,05 |        |
| 310 | Chiriguelo          | Paraguay | Censi et al., 1989; Castorina et al., 1997                                                            | 20 | 0,281  | -10,57 | 0,546 | 9,90  | 19,44 | 14,97 | -8,08 | -3,97 | -6,36 | -7,78 | 0,7072 |
| 318 | Wajilitage          | China    | Song et al., 2017                                                                                     | 9  | -0,580 | -0,20  | 0,674 | 6,40  | 9,50  | 7,62  | -5,80 | -3,90 | -4,62 | -3,91 | 0,7037 |
| 323 | Bayan Obo (dike)    | China    | Yang X et al., 2000; Le Bas, 2000                                                                     | 12 | 0,308  | -10,41 | 0,386 | 11,90 | 17,70 | 14,24 | -7,30 | -4,60 | -6,03 | -6,75 |        |
|     | Qieganbulake        | China    | Ye et al., 2013; Y. Jia and Y. Liu, 2023                                                              | 13 | 0,022  | -4,04  | 0,015 | 8,24  | 12,00 | 9,71  | -4,11 | -3,30 | -3,82 | -3,85 | 0,7056 |
| 332 | Dashigou            | China    | Xu et al., 2010                                                                                       | 6  | -0,162 | -5,43  | 0,212 | 7,22  | 8,78  | 7,87  | -6,90 | -6,36 | -6,71 | -6,60 |        |
| 337 | Miaoya              | China    | Gimen et al., 2018                                                                                    | 10 | 0,481  | -10,58 | 0,263 | 9,41  | 12,51 | 11,14 | -6,60 | -3,32 | -5,23 | -6,06 | 0,7036 |
| 338 | Shaxiongdong        | China    | Cheng Xu et al., 2008                                                                                 | 5  | 0,167  | -7,21  | 0,343 | 6,92  | 8,09  | 7,58  | -6,08 | -5,71 | -5,94 | -6,05 |        |
| 340 | Maoniuping          | China    | Zengqian Hou et al., 2009                                                                             | 7  | 0,953  | -13,62 | 0,798 | 7,00  | 9,70  | 8,03  | -6,90 | -3,90 | -5,97 | -6,95 | 0,7061 |



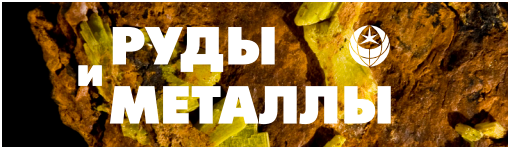


Продолжение таблицы

| 1   | 2                  | 3             | 4                                                                                                               | 5  | 6      | 7      | 8     | 9    | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16     |
|-----|--------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|--------|--------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 340 | Muluozhai          | China         | Zengqian Hou et al., 2009                                                                                       | 5  | -0,067 | -6,14  | 0,048 | 8,40 | 9,10  | 8,75  | -6,80 | -6,60 | -6,72 | -6,70 |        |
|     | South Qinling      | China         | Cheng Xu et al., 2014                                                                                           | 17 | 0,487  | -10,35 | 0,385 | 8,62 | 14,36 | 11,45 | -6,96 | -3,54 | -4,78 | -6,16 |        |
|     | Caotan (calcite)   | China-Qinling | Chun-Wan Wei et al., 2020                                                                                       | 8  | 0,299  | -9,41  | 0,657 | 7,49 | 9,96  | 8,50  | -7,19 | -6,11 | -6,88 | -7,17 | 0,7037 |
|     | Caotan (dolomite)  | China-Qinling | Chun-Wan Wei et al., 2020                                                                                       | 10 | -0,108 | -2,47  | 0,080 | 6,98 | 8,44  | 7,96  | -3,58 | -3,09 | -3,33 | -3,23 | 0,7057 |
| 346 | Sarnu-Dandali      | India-west    | Ray and Rames, 1999; Ray et al., 2000                                                                           | 7  | 0,585  | -10,31 | 0,913 | 8,20 | 10,50 | 8,91  | -5,70 | -4,20 | -5,10 | -5,52 |        |
| 349 | Mundwara           | India-west    | Ray and Rames, 1999; Ray et al., 2000                                                                           | 8  | 0,723  | -10,89 | 0,948 | 6,00 | 10,10 | 7,54  | -6,50 | -3,70 | -5,44 | -6,55 |        |
| 350 | Newania            | India-west    | Viladkar and Ramesh, 2014                                                                                       | 9  | 0,293  | -7,58  | 0,441 | 7,60 | 14,50 | 11,67 | -5,70 | -2,50 | -4,31 | -5,35 | 0,7021 |
| 355 | Siriwasan          | India-west    | Viladkar and Gittins, 2016                                                                                      | 11 | -0,074 | -4,81  | 0,044 | 8,50 | 17,80 | 11,60 | -7,40 | -3,50 | -5,67 | -5,44 | 0,7054 |
| 356 | Amba Dongar        | India-west    | Gwalani et al., 2010; Viladkar and Ramesh, 2014; Simonetti et al., 1995; Ray and Rames, 2000; Amit Tiwari, 2016 | 50 | 0,029  | -4,51  | 0,004 | 7,20 | 16,80 | 10,79 | -7,50 | -2,10 | -4,20 | -4,31 | 0,7055 |
| 356 | Amba Dongar - dike | India-west    | Viladkar and Ramesh, 2014; Gwalani et al., 2010                                                                 | 21 | 0,144  | -5,81  | 0,340 | 7,60 | 16,90 | 11,75 | -5,20 | -2,40 | -4,11 | -4,71 |        |
| 357 | Swangkre           | India-east    | Ray et al., 1999                                                                                                | 7  | -0,164 | -2,00  | 0,107 | 9,30 | 9,70  | 9,51  | -3,70 | -3,50 | -3,60 | -3,52 |        |
| 358 | Sung Valley        | India-east    | Ray et al., 1999; Srivastava et al., 2005; Viladkar and Ramesh, 2014; Amit Tiwari, 2016                         | 40 | -0,209 | -1,46  | 0,145 | 6,60 | 11,50 | 7,67  | -4,50 | -2,20 | -3,07 | -2,84 | 0,7047 |
| 360 | Samchampi          | India-east    | Ray et al., 1999                                                                                                | 11 | 0,068  | -4,07  | 0,004 | 7,00 | 7,60  | 7,25  | -3,80 | -3,00 | -3,60 | -3,60 | 0,7047 |
| 365 | Hogenakkal         | India-south   | Pandit, 2002                                                                                                    | 4  | -0,368 | -3,09  | 0,234 | 8,10 | 8,40  | 8,23  | -6,20 | -6,00 | -6,13 | -6,08 | 0,7016 |

Продолжение таблицы

| 1   | 2               | 3           | 4                                                                  | 5  | 6      | 7      | 8     | 9     | 10    | 11    | 12     | 13    | 14    | 15    | 16     |
|-----|-----------------|-------------|--------------------------------------------------------------------|----|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|
| 366 | Samalpatti      | India-south | Ackerman et al., 2017                                              | 6  | -0,182 | -1,54  | 0,251 | 10,10 | 12,40 | 10,78 | -3,99  | -3,14 | -3,50 | -3,38 | 0,7058 |
| 367 | Sevattur        | India-south | Pandit, 2002;<br>Kumar et al., 1998;<br>Ackerman et al., 2017      | 12 | -0,126 | -4,12  | 0,149 | 7,51  | 13,20 | 8,93  | -6,40  | -4,76 | -5,25 | -5,07 | 0,7052 |
| 369 | Mulakkadu       | India-south | Pandit, 2002                                                       | 5  | 0,211  | -5,35  | 0,256 | 7,30  | 7,78  | 7,44  | -3,90  | -3,70 | -3,78 | -3,81 | 0,7066 |
| 369 | Pakkanadu       | India-south | Privastava et al., 2022                                            | 28 | 0,131  | -6,90  | 0,046 | 7,50  | 9,10  | 8,25  | -4,90  | -6,30 | -5,82 | -5,92 |        |
| 369 | Pakkanadu       | India-south | Privastava et al., 2022                                            | 10 | 0,395  | -8,49  | 0,389 | 6,60  | 7,50  | 7,01  | -6,00  | -5,50 | -5,72 | -5,88 |        |
| 378 | Matcha          | Kirgystan   | Vrublevskii, 2017                                                  | 9  | 0,700  | -18,09 | 0,707 | 18,00 | 23,00 | 20,73 | -6,50  | -1,90 | -3,58 | -5,49 | 0,7070 |
| 379 | Hongcheon       | South Korea | Kim et al., 2005;<br>Kwon and Yeang, 2003                          | 7  | 0,857  | -14,53 | 0,594 | 7,96  | 12,81 | 9,53  | -9,31  | -3,89 | -6,36 | -7,71 |        |
|     | Yonghwa         | South Korea | Seo et al., 2016                                                   | 7  | 0,053  | -7,49  | 0,003 | 7,70  | 10,40 | 9,23  | -8,20  | -5,80 | -7,00 | -7,08 |        |
| 380 | Mushugai Khuduk | Mongolia    | Владыкин и др., 2004                                               | 5  | 0,574  | -10,72 | 0,324 | 14,60 | 16,90 | 15,50 | -3,00  | -0,70 | -1,82 | -2,34 | 0,7054 |
| 383 | Ulugei          | Mongolia    | Кулешов, 1986                                                      | 15 | 0,095  | -10,66 | 0,025 | 8,10  | 12,80 | 9,76  | -11,00 | -7,30 | -9,78 | -9,89 | 0,7041 |
| 393 | Seblyavr        | Russia-Cola | Кухаренко и др., 1962                                              | 3  | 0,342  | -10,66 | 0,200 | 10,10 | 13,90 | 12,63 | -7,40  | -4,40 | -6,33 | -7,20 |        |
| 398 | Khibiny         | Russia-Cola | Zaitzev, 1996;<br>Покровский, 2000                                 | 29 | 0,359  | -8,36  | 0,399 | 5,90  | 14,30 | 8,20  | -7,80  | -2,30 | -5,07 | -6,25 | 0,7036 |
| 399 | Ozernaya Varaka | Russia-Cola | Козлов, 2016                                                       | 12 | -0,748 | 1,99   | 0,566 | 7,40  | 9,70  | 8,37  | -6,30  | -3,70 | -4,27 | -3,54 | 0,7032 |
| 405 | Telyachi Island | Russia-Cola | Beard et al., 1996                                                 | 4  | 1,500  | -17,44 | 0,844 | 8,80  | 9,40  | 9,12  | -4,14  | -3,36 | -3,76 | -4,24 |        |
| 406 | Turiy Mys       | Russia-Cola | Dunworth and Bell, 2001; Demeny et al., 2004; Владыкин и др., 2004 | 17 | -0,073 | -2,12  | 0,022 | 7,40  | 8,96  | 7,94  | -3,07  | -2,20 | -2,70 | -2,66 | 0,7033 |
| 407 | Kovdor          | Russia-Cola | Плюснин и др., 1980; Владыкин и др., 2004                          | 7  | -0,051 | -1,68  | 0,031 | 9,40  | 15,80 | 12,10 | -3,40  | -1,20 | -2,30 | -2,16 | 0,7032 |
| 408 | Sallanlatvi     | Russia-Cola | Demeny et al., 2004                                                | 4  | 0,330  | -6,75  | 0,962 | 10,00 | 16,60 | 14,63 | -3,50  | -1,30 | -1,93 | -3,45 |        |
| 409 | Vuorijarvi      | Russia-Cola | Demeny et al., 2004; Владыкин и др., 2004; Fomina and Kozlov, 2021 | 18 | 0,117  | -5,02  | 0,101 | 6,80  | 11,80 | 8,05  | -4,80  | -3,40 | -4,08 | -4,22 | 0,7056 |



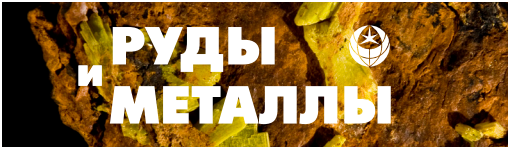
Продолжение таблицы

| 1   | 2                            | 3             | 4                                                 | 5  | 6      | 7      | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16     |
|-----|------------------------------|---------------|---------------------------------------------------|----|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 410 | Tikshezero                   | Russia-Cola   | Tichomirovd et al., 1992                          | 8  | -0,851 | 1,54   | 0,073 | 7,40  | 7,70  | 7,56  | -5,30 | -4,50 | -4,90 | -4,76 | 0,7023 |
| 413 | Chetlassky                   | Russia-Europe | Удoratина и др., 2014; Шумилова и др., 2012       | 54 | 0,128  | -5,34  | 0,297 | 8,30  | 15,20 | 11,01 | -4,90 | -3,00 | -3,93 | -4,27 | 0,7034 |
|     | Dubravinsky                  | Russia-Europe | Луговая и др., 2012; Savko et al., 2023           | 18 | -0,140 | -4,25  | 0,144 | 8,00  | 15,60 | 10,31 | -8,60 | -4,70 | -5,70 | -5,38 | 0,7020 |
| 414 | Vishnevogorsky               | Russia-Ural   | Недосекова и др., 2012; Nedosekova et al., 2013   | 7  | 1,044  | -14,98 | 0,499 | 7,00  | 8,00  | 7,53  | -7,90 | -6,30 | -7,10 | -7,67 | 0,7036 |
|     | Potanino                     | Russia-Ural   | Недосекова и др., 2012; Nedosekova et al., 2013   | 8  | -0,538 | -1,83  | 0,068 | 7,70  | 8,80  | 8,16  | -7,70 | -5,30 | -6,20 | -5,98 |        |
|     | Buldym                       | Russia-Ural   | Недосекова и др., 2012; Nedosekova et al., 2013   | 5  | -0,044 | -7,41  | 0,011 | 8,00  | 10,40 | 8,96  | -8,20 | -7,40 | -7,80 | -7,76 | 0,7044 |
| 417 | Guli                         | Russia-Taimyr | Владыкин и др., 2004                              | 8  | 0,295  | -6,33  | 0,519 | 6,30  | 11,60 | 8,26  | -5,30 | -2,90 | -3,89 | -4,47 | 0,7031 |
| 428 | Essei                        | Russia-Taimyr | Кравченко, Багдасаров, 1987; Владыкин и др., 2004 | 9  | 0,279  | -6,58  | 0,724 | 8,00  | 18,71 | 11,88 | -4,47 | -1,15 | -3,27 | -4,35 | 0,7033 |
| 430 | Tomtor                       | Russia-Taimyr | Пономарчук и др., 2020; Покровский, 2000          | 20 | 0,040  | -4,00  | 0,020 | 7,10  | 17,00 | 11,90 | -4,80 | -2,10 | -3,48 | -3,71 | 0,7034 |
|     | East Taimyr                  | Russia-Taimyr | Проскурнин и др., 2010                            | 5  | 0,245  | -7,11  | 0,172 | 6,20  | 14,70 | 11,96 | -6,20 | -1,00 | -4,18 | -5,59 | 0,7072 |
| 436 | Upper Petropavlovka          | Russia-Asia   | Vrublevskii, 2015                                 | 10 | 0,307  | -6,89  | 0,799 | 11,80 | 15,50 | 13,84 | -3,50 | -2,00 | -2,64 | -3,27 | 0,7057 |
| 437 | Edelveis                     | Russia-Asia   | Врублевский и др., 2012                           | 9  | 1,506  | -26,38 | 0,460 | 12,30 | 14,90 | 13,81 | -8,40 | -2,70 | -5,59 | -7,86 | 0,7033 |
| 438 | Tagna                        | Russia-Asia   | Владыкин и др., 2004                              | 3  | -0,786 | 6,80   | 0,682 | 12,00 | 12,50 | 12,30 | -3,10 | -2,60 | -2,87 | -2,63 | 0,7031 |
| 439 | Nizhnesayansky (Belaya Zima) | Russia-Asia   | Doroshkevich et al., 2016; Владыкин и др., 2004   | 32 | 0,336  | -7,94  | 0,512 | 6,10  | 11,35 | 7,68  | -6,10 | -4,00 | -5,35 | -5,89 | 0,7029 |

Продолжение таблицы

| 1   | 2                               | 3           | 4                                                         | 5  | 6      | 7      | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16     |
|-----|---------------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------|----|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 440 | Verkhnesayansky (Sredniya Zima) | Russia-Asia | Владыкин и др., 2004                                      | 3  | -0,263 | -3,70  | 0,987 | 6,80  | 7,60  | 7,10  | -5,70 | -5,50 | -5,57 | -5,49 | 0,7029 |
|     | Karasug-calcite                 | Russia-Tuva | Болонин, 1983; Никифоров и др., 2006                      | 8  | 0,188  | -6,51  | 0,587 | 8,80  | 14,70 | 11,76 | -4,90 | -3,60 | -4,30 | -4,86 | 0,7042 |
|     | Karasug-siderite                | Russia-Tuva | Болонин, 1983; Никифоров и др., 2006                      | 11 | -0,174 | -3,46  | 0,047 | 9,20  | 13,50 | 11,44 | -6,50 | -3,90 | -5,45 | -5,06 | 0,7042 |
|     | Karasug-Chahol                  | Russia-Tuva | Никифоров и др., 2006                                     | 3  | 1,296  | -10,33 | 1,000 | 5,50  | 6,80  | 6,30  | -3,20 | -1,50 | -2,17 | -3,20 | 0,7060 |
|     | Karasug-Ulatay                  | Russia-Tuva | Никифоров и др., 2006                                     | 7  | -0,178 | -2,19  | 0,301 | 9,80  | 13,40 | 11,14 | -4,50 | -3,70 | -4,17 | -3,93 | 0,7043 |
| 441 | Kharly                          | Russia-Tuva | Врублевский, 2003                                         | 12 | -0,072 | -2,12  | 0,024 | 14,00 | 18,60 | 16,62 | -4,00 | -2,30 | -3,32 | -3,13 |        |
| 443 | Zhidoy                          | Russia-Asia | Morikiyo et al., 2005                                     | 4  | 0,569  | -9,69  | 0,220 | 7,10  | 7,50  | 7,33  | -5,80 | -5,20 | -5,53 | -5,65 | 0,7030 |
| 445 | Yuzhnoe                         | Russia-Asia | Никифоров и др., 2000; Рипп и др., 2000                   | 3  | -0,024 | -5,71  | 0,001 | 6,20  | 7,10  | 6,60  | -6,10 | -5,50 | -5,90 | -5,86 | 0,7063 |
| 446 | Khaluta                         | Russia-Asia | Никифоров и др., 2000; Рипп и др., 2000; Дорошкевич, 2013 | 9  | -0,122 | -4,81  | 0,278 | 5,40  | 9,10  | 8,04  | -6,20 | -5,20 | -5,80 | -5,47 | 0,7057 |
| 448 | Oshurkovo                       | Russia-Asia | Никифоров и др., 2000; Рипп и др., 2000, 2014             | 18 | 0,013  | -6,10  | 0,002 | 5,00  | 14,90 | 8,75  | -7,90 | -5,00 | -6,20 | -6,03 | 0,7053 |
|     | Western Baikal                  | Russia-Asia | Savelyeva et al., 2015                                    | 6  | 0,422  | -8,51  | 0,447 | 11,90 | 13,10 | 12,37 | -3,70 | -2,90 | -3,28 | -3,48 | 0,7048 |
| 450 | Veselo                          | Russia-Asia | Doroshkevich et al., 2007; Ласточкин, 2009                | 10 | -0,261 | 1,06   | 0,102 | 9,10  | 11,20 | 10,16 | -2,50 | -0,80 | -1,59 | -1,31 |        |
| 451 | Pogranichnoe                    | Russia-Asia | Doroshkevich et al., 2006                                 | 5  | 0,228  | -2,05  | 0,567 | 8,41  | 10,18 | 9,12  | -0,20 | 0,30  | -0,02 | -0,14 | 0,7038 |
|     | Ulan-Ude                        | Russia-Asia | Ripp et al., 2019                                         | 4  | -0,425 | -2,92  | 0,300 | 4,60  | 8,30  | 6,55  | -6,60 | -3,60 | -5,70 | -4,87 | 0,7056 |



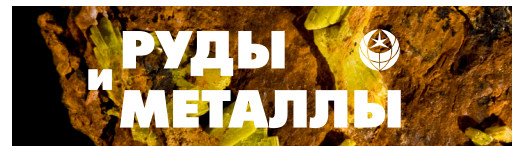


Продолжение таблицы

| 1   | 2             | 3           | 4                                              | 5  | 6      | 7      | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16     |
|-----|---------------|-------------|------------------------------------------------|----|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 452 | Murun         | Russia-Asia | Vladikin et al., 2004; Покровский, 2000        | 20 | 0,236  | -9,34  | 0,111 | 6,00  | 10,40 | 8,42  | -9,20 | -5,20 | -7,36 | -7,93 | 0,7062 |
| 453 | Seligdar      | Russia-Asia | Doroshkevich et al., 2018                      | 5  | 0,914  | -20,42 | 0,149 | 15,90 | 17,00 | 16,48 | -6,10 | -4,10 | -5,36 | -5,89 | 0,7042 |
| 459 | Ingili        | Russia-Asia | Владыкин и др., 2004                           | 4  | 0,172  | -7,95  | 0,928 | 8,00  | 13,90 | 10,75 | -6,60 | -5,40 | -6,10 | -6,57 | 0,7024 |
| 460 | Arbarastakh   | Russia-Asia | Владыкин и др., 2004                           | 3  | -0,156 | -3,78  | 0,123 | 7,60  | 9,30  | 8,27  | -5,30 | -4,60 | -5,07 | -4,96 | 0,7025 |
| 462 | Koksharovsky  | Russia-Asia | Октябрьский и др., 2010                        | 9  | -0,117 | -3,88  | 0,136 | 9,00  | 13,30 | 11,00 | -5,70 | -4,20 | -5,17 | -4,93 | 0,7036 |
| 464 | Eppawala      | Sri Lanka   | Manthilake et al., 2008; Pitawala et al., 2003 | 27 | 0,160  | -4,96  | 0,522 | 7,70  | 16,40 | 14,27 | -3,55 | -1,99 | -2,69 | -3,73 | 0,7049 |
| 471 | Chagatai      | Uzbekistan  | Шумилова и др., 2012; Лохов и др., 2007        | 11 | 0,249  | -4,21  | 0,375 | 6,50  | 13,20 | 10,05 | -3,50 | -0,40 | -1,71 | -2,59 |        |
| 472 | South Nam Xe  | Vietnam     | Thuy et al., 2014                              | 17 | 0,279  | -6,04  | 0,232 | 9,10  | 11,00 | 9,80  | -3,90 | -2,70 | -3,30 | -3,51 | 0,7082 |
| 475 | Gifford Creek | Australia   | Slezak, Paul, 2019                             | 14 | -0,356 | -1,87  | 0,073 | 9,20  | 11,10 | 10,43 | -7,10 | -5,00 | -5,58 | -5,14 | 0,7057 |
| 476 | Wallaby       | Australia   | Salier et al., 2004                            | 5  | -0,131 | -4,06  | 0,099 | 9,24  | 12,08 | 10,51 | -6,13 | -5,03 | -5,44 | -5,28 | 0,7033 |
| 479 | Yungul        | Australia   | Gwalani et al., 2010                           | 36 | 0,137  | -7,60  | 0,512 | 10,40 | 15,60 | 13,75 | -6,30 | -5,10 | -5,71 | -6,17 |        |
| 481 | Cummins Range | Australia   | Downes et al., 2014                            | 7  | 0,334  | -6,72  | 0,126 | 7,50  | 8,80  | 8,33  | -4,20 | -3,00 | -3,94 | -4,22 |        |
| 484 | Haast River   | New Zealand | Cooper and Paterson, 2008                      | 10 | 0,237  | -8,35  | 0,932 | 6,70  | 16,20 | 10,77 | -6,70 | -4,40 | -5,80 | -6,76 |        |
| 488 | Sokli         | Finland     | Demeny et al., 2004                            | 7  | 0,498  | -7,67  | 0,876 | 7,10  | 10,00 | 7,86  | -4,10 | -2,60 | -3,76 | -4,13 |        |
| 489 | Laivajoki     | Finland     | Nykanen et al., 1997                           | 7  | -0,559 | -0,63  | 0,677 | 5,91  | 7,44  | 6,81  | -4,92 | -3,60 | -4,44 | -3,93 |        |
| 490 | Kortejärvi    | Finland     | Nykanen et al., 1997                           | 7  | -0,180 | -2,69  | 0,553 | 6,58  | 9,30  | 7,49  | -4,33 | -3,67 | -4,03 | -3,87 |        |

Продолжение таблицы

| 1   | 2                          | 3                 | 4                                                                         | 5  | 6      | 7      | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16     |
|-----|----------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------|----|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 492 | Siilinjarvi                | Finland           | Demeny et al., 2004                                                       | 5  | -0,287 | -1,72  | 0,192 | 7,40  | 9,10  | 8,36  | -4,60 | -3,60 | -4,12 | -3,84 | 0,7014 |
| 497 | Laacher See                | Germany           | Hugh et al., 1966;<br>Jones et al., 2013                                  | 13 | -0,148 | -5,51  | 0,006 | 6,30  | 8,30  | 7,39  | -7,70 | -3,10 | -6,60 | -6,44 |        |
| 498 | Rockeskyll<br>(Auf Dickel) | Germany           | Riley et al., 1999                                                        | 3  | -0,099 | -3,84  | 0,475 | 11,10 | 14,40 | 12,40 | -5,30 | -4,80 | -5,07 | -4,94 | 0,7041 |
| 499 | Kaiserstuhl                | Germany           | Hubberten, 1988;<br>Dolenek, 2015;<br>Dennis and Schrag,<br>2010          | 54 | -0,030 | -5,66  | 0,013 | 5,70  | 16,20 | 9,69  | -7,20 | -3,80 | -5,95 | -5,83 | 0,7036 |
|     | Mt. Vulture                | Italy             | Stoppa et al., 2016;<br>Rosatelli et al., 2010                            | 4  | 0,253  | -7,53  | 0,340 | 10,30 | 12,00 | 10,90 | -5,20 | -4,40 | -4,78 | -4,93 | 0,7065 |
| 510 | Fen                        | Norway            | Broom-Fendley et<br>al., 2016; Andersen,<br>1987                          | 10 | -0,088 | -4,14  | 0,099 | 5,70  | 9,28  | 7,34  | -5,10 | -3,80 | -4,79 | -4,65 | 0,7021 |
| 515 | Alnö                       | Sweden            | Roopnarain, 2013;<br>Hugh et al., 1966;<br>Jones, Genge,<br>Carmody, 2013 | 29 | 0,030  | -5,76  | 0,000 | 6,40  | 8,67  | 7,71  | -7,30 | -3,09 | -5,53 | -5,57 | 0,7029 |
|     | Zhlobin                    | Belarusia         | Веретенников<br>и др., 2007                                               | 4  | -0,197 | -2,65  | 0,012 | 22,10 | 23,20 | 22,73 | -8,30 | -6,40 | -7,13 | -7,00 |        |
| 518 | Chernigovsky               | Ukraine           | Луговая и др., 1978                                                       | 15 | -0,039 | -5,38  | 0,013 | 5,30  | 11,70 | 8,81  | -6,50 | -4,50 | -5,73 | -5,59 | 0,7013 |
| 520 | Fuerteventura              | Spain<br>Canaries | Hoernle et al., 2002;<br>Шумилова и др.,<br>2012                          | 12 | -0,271 | -3,73  | 0,223 | 6,60  | 8,20  | 7,32  | -6,30 | -5,20 | -5,72 | -5,52 | 0,7032 |
| 524 | Fogo                       | Cape Verdes       | Hoernle et al., 2002                                                      | 4  | 0,308  | -8,73  | 0,330 | 5,30  | 7,90  | 6,58  | -7,50 | -5,90 | -6,70 | -7,09 | 0,7031 |
| 525 | Sao Tiago                  | Cape Verdes       | Hoernle et al., 2002                                                      | 9  | 0,674  | -12,01 | 0,942 | 6,90  | 16,30 | 12,99 | -7,20 | -1,00 | -3,26 | -7,36 |        |
| 526 | Maio                       | Cape Verdes       | Hoernle et al., 2002                                                      | 3  | -0,026 | -0,98  | 0,287 | 12,30 | 14,40 | 13,66 | -1,40 | -1,30 | -1,35 | -1,30 |        |



## Список литературы

1. Кулешов В. Н. Изотопный состав и происхождение глубинных карбонатов // Труды ГИН АН СССР. Вып. 405. – М. : Наука, 1986. – 128 с.
2. Покровский Б. Г. Коровая контаминация мантийных магм по данным изотопной геохимии // Труды ГИН РАН. Вып. 535. – М. : Наука, 2000. – 222 с.
3. Bolonin A. V. Oxygen and Carbon Isotope Composition in Primary Carbonatites of the World: Data Summary and Linear Trends // Open Journal of Geology. – 2019. – V. 9, № 8. – P. 424–439. DOI: 10.4236/ojg.2019.98028.
4. Deines P. Stable isotope variations in carbonatites / Carbonatites: Genesis and Evolution. – London : Unwin Hyman, 1989. – P. 301–359.
5. Jones A. P., Genge M., Carmody L. Carbonate Melts and Carbonatites // Reviews in Mineralogy & Geochemistry. – 2013. – V. 75. – P. 289–322.
6. Ray I. S., Ramesh R. Rayleigh fractionation of stable isotopes from a multicomponent source // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2000. – № 64. – P. 299–306.
7. Salomons W. Chemical and isotopic composition of carbonatites in recent sediments and soils from Western Europe // Journal of Sedimentary Petrology. – 1975. – V. 45, № 2. – P. 440–449.
8. Woolley A. R. and Kjarsgaard B. A. Carbonatite occurrences of the world: Map and database. – Ottawa : Geological Survey of Canada, 2008.

## References

1. Kuleshov V. N. Izotopnyi sostav i proiskhozhdenie glubinnykh karbonatov [Isotopic composition and origin of deep carbonates], *Trudy GIN AN SSSR [Proceedings of the GIN AS USSR]*, Moscow, Nauka Publ., 1986, Iss. 405, 128 p. (In Russ.).
2. Pokrovskii B. G. Korovaya kontaminatsiya mantiinykh magm po dannym izotopnoi geokhimii [Crustal contamination of mantle magmas according to isotope geochemistry data], *Trudy GIN RAN [Proceedings of the GIN RAS]*, Moscow, Nauka Publ., 2000, 222 p. (In Russ.).
3. Bolonin A. V. Oxygen and Carbon Isotope Composition in Primary Carbonatites of the World: Data Summary and Linear Trends, *Open Journal of Geology*, 2019, V. 9, No 8, pp. 424–439. DOI: 10.4236/ojg.2019.98028.
4. Deines P. Stable isotope variations in carbonatites, In *Carbonatites: Genesis and Evolution*, London, Unwin Hyman Publ, 1989, pp. 301–359.
5. Jones A. P., Genge M., Carmody L. Carbonate Melts and Carbonatites, *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2013, V. 75, pp. 289–322.
6. Ray I. S., Ramesh R. Rayleigh fractionation of stable isotopes from a multicomponent source, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, No 64, pp. 299–306.
7. Salomons W. Chemical and isotopic composition of carbonatites in recent sediments and soils from Western Europe, *Journal of Sedimentary Petrology*, 1975, V. 45, No 2, pp. 440–449.
8. Woolley A. R. and Kjarsgaard B. A. Carbonatite occurrences of the world: Map and database, Ottawa, Geological Survey of Canada, 2008.

**Болонин Александр Васильевич** (bolonin.a@inbox.ru)

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва, Россия