

УДК 552.16

ИЗОТОПНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАРБОНАТОВ ПОРОД ЗЕЛЕНОКАМЕННЫХ ПОЯСОВ КАК ИНДИКАТОР ВОЗМОЖНОГО ИСТОЧНИКА ФЛЮИДОВ В ГРАНУЛИТОВЫХ КОМПЛЕКСАХ ДОКЕМБРИЯ: ПРИМЕР ИЗ ЗЕЛЕНОКАМЕННОГО ПОЯСА ГИЯНИ И ГРАНУЛИТОВОГО КОМПЛЕКСА ЛИМПОПО (ЮАР)

© 2020 г. А. С. Митяев^{1,2,*}, О. Г. Сафонов^{1,2,4}, В. Н. Реутский³, О. П. Изох³, Д. А. Варламов¹,
В. М. Козловский⁵, Д. Д. ван Ринен⁴, член-корреспондент РАН Л. Я. Аранович^{5,1}

Поступило 11.03.2020 г.

После доработки 13.03.2020 г.

Принято к публикации 13.03.2020 г.

В сообщении представлены данные об изотопном составе углерода и кислорода карбонатов из пород зеленокаменного пояса Гияни, кратон Каапвааль, Южная Африка. Этот пояс непосредственно сопряжен с региональной зоной сдвиговых деформаций Хоут-Ривер, по которой Южная Краевая Зона (ЮКЗ) гранулитового комплекса Лимпопо надвинута на кратон Каапвааль. Значения $\delta^{13}\text{C}$ для карбонатов двух образцов метапелитов составляют -2.1 и -2.2‰ , для образца метаультрабазита -5.1‰ , а для двух образцов метабазитов -7.1 и -7.7‰ соответственно. Значения $\delta^{18}\text{O}$ составляют 17.1 и 17.5‰ для карбонатов из метапелитов, 14.3‰ для карбонатов из метаультрабазита, 12.9 и 13.0‰ для карбонатов из метабазитов. Сравнение полученных данных с опубликованными по изотопному составу карбонатов из пород различных зеленокаменных поясов показывает, что карбонатный материал в изученных породах имеет как гидротермальное (в метабазитах и метаультрабазите), так и осадочное (в метапелитах) происхождение. На основе сравнения этих данных с $\delta^{13}\text{C}$ углерода магнезита, возникшего в ультраосновных гранулитах в ходе взаимодействия комплекса Лимпопо с кратоном, углерода графита и флюидных включений в лейкократовых гранатсодержащих гранитоидах, переносивших флюиды, а также изотопного состава углерода графита из метапелитов ЮКЗ, сделан вывод о том, что источник углерода находился за пределами ЮКЗ и представлял собой гетерогенный карбонатсодержащий субстрат. Им могли служить карбонатсодержащие вулканогенно-осадочные толщи зеленокаменных поясов кратона Каапвааль, испытывавшие проградный метаморфизм при взаимодействии с гранулитами ЮКЗ.

Ключевые слова: изотопия углерода, флюиды, зеленокаменные пояса, комплекс Лимпопо, карбонаты, архей

DOI: 10.31857/S2686739720050151

Богатые CO_2 флюиды играли определяющую роль в процессах формирования докембрийских

гранулитовых комплексов, расположенных по периферии древних континентальных блоков (кратонов) [1]. Внутренним источником CO_2 в гранулитах могли служить карбонаты и графит, присутствовавшие в породах до метаморфизма. Однако продуцирование CO_2 в результате разложения карбонатов или окисления графита наиболее эффективно на прогрессивной стадии метаморфизма, тогда как активное воздействие углекислых флюидов на регрессивной стадии эволюции гранулитовых комплексов было связано преимущественно с разнообразными внешними источниками. В качестве такого главного источника рассматриваются CO_2 -содержащие основные магмы, аккумуляровавшиеся в основании континентальной коры в ходе плавления в верхней мантии и служившие также источником тепла для метаморфизма

¹ Институт экспериментальной минералогии им. Д.С. Коржинского Российской академии наук, Черноголовка, Московская область, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

⁴ Департамент геологии, Университет Йоханнесбурга, Йоханнесбург, ЮАР

⁵ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: classic_ten@mail.ru

[2]. В ходе регрессивной стадии метаморфизма, связанной с подъемом к поверхности, гранулитовые комплексы активно взаимодействовали с древними континентальными блоками. Породы этих блоков также могли служить источником флюидов, в том числе богатых CO_2 , действующих на гранулиты.

Активное взаимодействие горячих гранулитов с кратоном хорошо охарактеризовано для Южной Краевой Зоны (ЮКЗ) неоархейского-палеопротерозойского (2.72–2.01 млрд. лет) гранулитового комплекса Лимпопо, ЮАР [3]. Эта зона является классическим примером надвига высокометаморфизованных пород на древний кратон Каапвааль [3]. Прогрессивный метаморфизм пород кратона при надвиге гранулитов ЮКЗ в период времени 2.69–2.66 млрд. лет сопровождался выделением из них водно-углекислых флюидов, которые взаимодействовали с гранулитами вдоль тектонических зон или через гранитоидные интрузии. Значения $\delta^{13}\text{C}$ углерода магнезита ($-5.5\text{...}-6.0\text{‰}$), возникшего в ультраосновных гранулитах в ходе этого взаимодействия [4], углерода графита ($-6.5\text{...}-8.6\text{‰}$) и флюидных включений ($-4.1 \pm 1.2\text{‰}$) в лейкократовых гранатсодержащих гранитоидах [5], переносивших флюиды, значительно отличаются от изотопного состава углерода графита из метапелитов ЮКЗ ($-12.5\text{...}-15.2\text{‰}$) [6]. Этот факт подтверждает наличие некоего источника углерода, который находился за пределами ЮКЗ и представлял собой, вероятно, гетерогенный карбонатсодержащий субстрат. Им могли служить карбонатсодержащие вулканогенно-осадочные толщи зеленокаменных поясов кратона Каапвааль, испытавшие проградный метаморфизм при взаимодействии с гранулитами ЮКЗ. Этот вывод был сделан в [5] на основе сравнения приведенных выше изотопных данных с обобщенными данными об изотопном составе карбонатов пород зеленокаменных поясов различных кратонов, в том числе поясов кратона Каапвааль, удаленных от комплекса Лимпопо (например, пояс Барбертон [7]). Данные же для пород зеленокаменных поясов, непосредственно контактирующих с комплексом Лимпопо, отсутствовали.

В данном сообщении приведены результаты определений изотопного состава углерода и кислорода карбонатов пород зеленокаменного пояса Гияни, сопряженного с региональной зоной сдвиговых деформаций Хоут-Ривер, по которой гранулиты ЮКЗ надвинуты на кратон Каапвааль. Пояс Гияни сложен, главным образом, слабометаморфизованными сланцами ультраосновного, основного и изредка кислого состава, а также железистыми кварцитами, метапелитами и доломитами [8]. В северной части пояса присутствуют блоки пород, испытавших метаморфизм при давлениях до 6.5 кбар и температурах 550–600°C под

воздействием гранулитов [9]. Эти блоки заключены в породы более низкой степени метаморфизма, среди которых широко представлены карбонатсодержащие разности. Проградный метаморфизм таких пород вполне мог приводить к выделению водно-углекислых флюидов, проникших в гранулиты через зону Хоут-Ривер.

Исследованы пять образцов карбонатсодержащих пород из северной части пояса Гияни [8, 9]. Метаультрабазит (образец 17-6) состоит из зональных кристаллов амфибола и аксессуарных ильменита и магнетита, погруженных в хлорит-карбонатную матрицу. Карбонат, слагающий около 8 об. % породы, представлен доломит-анкеритом с магнезиальностью $X_{\text{Mg}} = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}) = 0.40\text{--}0.45$ (составы минералов определялись на электронном сканирующем микроскопе "Tescan" Vega ПХМУ с энергодисперсионным спектрометром "INCA" Energy 450 в ИЭМ РАН). Два образца метабазитов, 17-8 и 17-5, содержат зональные кристаллы амфибола с варьирующей концентрацией CaO , биотит с $X_{\text{Mg}} = 0.42\text{--}0.46$ и 1.6–2.3 мас. % TiO_2 , кварц, плагиоклаз ($X_{\text{An}} = 0.25$), аксессуарные ильменит, апатит и сульфиды железа. Содержание карбонатных минералов в образцах составляет ~10 об. %. В образце 17-8, помимо преобладающего кальцита, присутствуют два карбоната доломит-анкеритового состава с магнезиальностями 0.6 и 0.4 соответственно. В метабазите 17-5 карбонат представлен только кальцитом. Бóльшее содержание биотита выражено в более высоком валовом содержании K_2O (2.28 мас. % в отличие от 0.36 мас. % в образце 17-8). Образцы карбонатсодержащих метапелитов, MAS-13 и MAS-18, различаются количественными соотношениями кварца, плагиоклаза ($X_{\text{An}} = 0.23$), биотита ($X_{\text{Mg}} = 0.48$, $\text{TiO}_2 = 2.5\text{--}3$ мас. %), аксессуарных ильменита, апатита и фосфатов РЗЭ. В породах присутствуют как кальцит (~9 об. %), так и доломит-анкеритовый карбонат (<1%).

Анализ изотопного состава углерода и кислорода карбонатов из указанных образцов проводился в ЦКП МИИ СО РАН на базе ИГМ СО РАН (Новосибирск). Карбонатный материал отбирался из образцов с помощью абразивного сверла. Карбонатную пудру далее разлагали в ортофосфорной кислоте при температуре 60°C в устройстве GasBenchII. Для Fe-содержащих карбонатов время реакции было увеличено до 160 ч. Изотопный состав углерода в выделившемся чистом CO_2 анализировался на масс-спектрометре "Finnigan" MAT-253 в режиме постоянного тока гелия. Точность измерений $\delta^{13}\text{C}$ карбонатного материала контролировалась международным стандартом NBS-19 ($\delta^{13}\text{C} = +1.9\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -2.2\text{‰}$) и составляла 0.1‰ для $\delta^{13}\text{C}$ и 0.3‰ для $\delta^{18}\text{O}$.

Измеренные значения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ приведены в табл. 1. Значения $\delta^{13}\text{C}$ находятся в пределах интервала $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -0.5$ до -9‰ , характерных для карбонатов в породах архейских зеленокаменных поясов (см. обзорную таблицу в [7]). Значения $\delta^{13}\text{C}$ для карбонатов из образцов метаультрабазита и метабазитов совпадают со значениями, типичными для глубинных источников углерода, $-6 \pm 2\text{‰}$ PDB [10] (рис. 1), что оправдано для продуктов метаморфизма ультраосновных и основных вулканических пород. Однако значения $\delta^{18}\text{O}$ этих карбонатов заметно выше тех, что характеризуют глубинные источники [10] (рис. 1). Полученные значения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ для карбонатов из метаультрабазита и метабазитов (табл. 1) близки к интервалам -4‰ – -6‰ и 8‰ – 14‰ соответственно, выделенным Д. Гроувсом и соавт. [11] для карбонатов в зонах региональной флюидной проработки ультраосновных и основных пород в архейских зеленокаменных поясах Западной Австралии (рис. 1). Более “тяжелые” значения $\delta^{13}\text{C}$ для карбонатов метапелитов MAS-13 и MAS-18 (табл. 1) попадают в интервал от -1 до -2.5‰ , выделенный теми же авторами [11] для карбонатов – продуктов воздействия морской воды на породы морского дна (рис. 1). Однако значения $\delta^{18}\text{O}$ для таких карбонатов (8‰ – 12‰ ; [11]) заметно ниже тех, которые получены для карбонатов из метапелитов MAS-13 и MAS-18 (17.1 и 17.5‰ ; табл. 1, рис. 1). Значения $\delta^{18}\text{O}$ для карбонатов из метапелитов MAS-13 и MAS-18 смещены в сторону значений, характерных для карбонатов, равновесных с морской водой при низких температурах ($>20\text{‰}$; например, в [12]) и близки к значениям, характерным для докембрийских морских карбонатов [13] (рис. 1). Пересчет валовых составов этих пород по методу А.А. Предовского с учетом ~ 6 об. % CaCO_3 в их составе показал, что геохимические характеристики метапелитов MAS-13 и MAS-18 соответствуют грауваккам. Таким образом, они, скорее всего, представляют собой продукты метаморфизма кластического материала с примесью карбонатов как гидротермального, так и хемогенного осадочного происхождения.

На рис. 2 полученные значения $\delta^{13}\text{C}$ для карбонатов пород зеленокаменного пояса Гияни сопоставлены с данными по изотопному составу углерода в различных породах ЮКЗ гранулитового комплекса Лимпопо, контактирующей с этим зеленокаменным поясом. Значения $\delta^{13}\text{C}$ для доломит-анкерита из метаультрабазита 17-6 (табл. 1) близко к значениям $\delta^{13}\text{C} = -5.5\text{‰}$ – -6.0‰ для магнетита из ультраосновных гранулитов ЮКЗ [4] (рис. 2). Однако вряд ли такое совпадение означает наследование карбонатов в гранулитах из ультраосновных пород зеленокаменных поясов. Магнетит в гранулитах не является минералом

Таблица 1. Значения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ для карбонатов из пород зеленокаменного пояса Гияни, ЮАР

Образец	Порода	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
17-6	метаультрабазит	-5.1	14.3
17-8	метабазит	-7.7	12.9
17-5	метабазит	-7.1	13.0
MAS-13	метапелит	-2.1	17.1
MAS-18	метапелит	-2.2	17.5

пика метаморфизма, а возникал лишь на регрессивной стадии при температурах порядка 670°C и давлениях 6 кбар вследствие воздействия водно-углекислых флюидов [4]. По нашему мнению, совпадение значений $\delta^{13}\text{C}$ указывает на то, что источником этих флюидов могли быть породы зеленокаменных поясов, погруженных под гранулиты ЮКЗ.

О.Г. Сафонов и соавт. [5] определили вариации $\delta^{13}\text{C} = -5.6\text{‰}$ – -2.5‰ для углерода флюидных

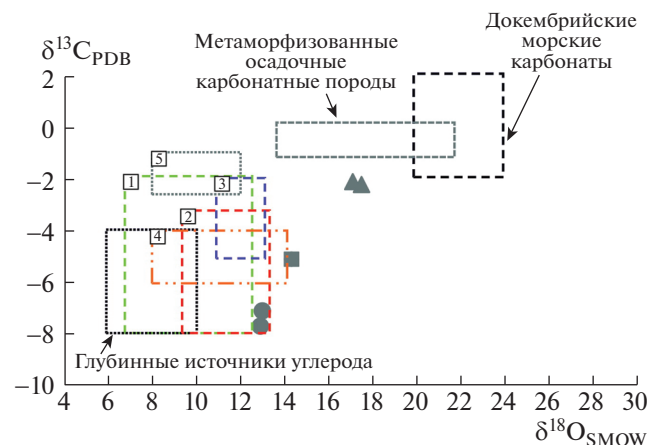


Рис. 1. Соотношения $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ от $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ для карбонатов из изученных метапелитов MAS-13 и MAS-18 (серые треугольники), метабазитов 17-5 и 17-8 (серые круги) и метаультрамафита 17-6 (серый квадрат) в сравнении с опубликованными данными: (1) – (3) карбонаты из пород различных архейских зеленокаменных поясов [7], (4) поле, выделенное Д. Гроувсом и соавт. [11] для карбонатов в зонах региональной флюидной проработки ультраосновных и основных пород в архейских зеленокаменных поясах Западной Австралии, (5) поле, выделенное Д. Гроувсом [11] для карбонатов – продуктов воздействия морской воды на породы морского дна. Нанесены поля для глубинного источника углерода [10], для метаморфизованных осадочных карбонатных пород [7] и для докембрийских морских карбонатов [13].

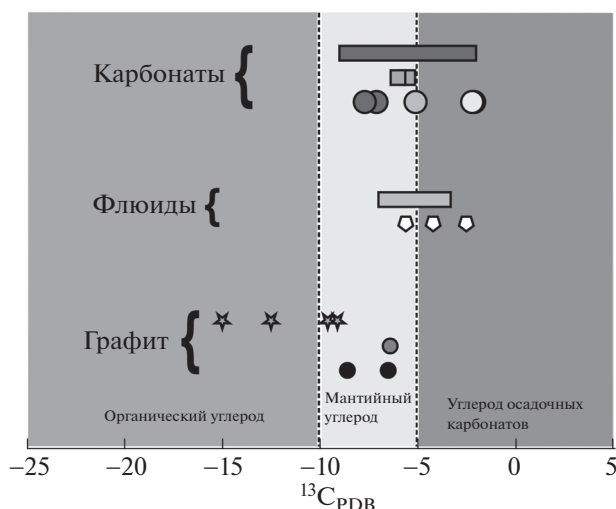


Рис. 2. Изотопный состав углерода карбонатов из изученных пород зеленокаменного пояса Гияни: пелитов MAS-13 и MAS-18 (большие белые круги), метаультрабазит 17-6 (большой светло-серый круг), метабазитов 17-5 и 17-8 (большие темно-серые круги). Для сравнения приведены опубликованные данные по $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ графита из метапелитов формации Бандерлиеркоп [6] (звездочки), графита из гранатсодержащей тронджемитовой жилы [6] (маленький серый круг), карбонатов из метаультрабазитовых гранулитов формации Бандерлиеркоп [4] (серые квадраты). Темно-серый прямоугольник показывает диапазон $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ гидротермальных карбонатов из зеленокаменных поясов [7], светло-серый прямоугольник показывает диапазон $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ флюидных включений в кварце и карбонатах гидротермальных жил в зеленокаменных поясах [7], белые многоугольники – $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ флюидных включений, а маленькие черные круги – $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ графита из лейкократовых гранатсодержащих гранитоидов ЮКЗ комплекса Лимпопо [5].

включений в минералах гранатсодержащих лейкократовых гранитоидов, внедренных в метапелиты ЮКЗ на регрессивной стадии метаморфизма (рис. 2). Верхнее значение этого интервала близко к $\delta^{13}\text{C}$ для карбонатов из метапелитов MAS-13 и MAS-18 (табл. 1, рис. 2). Породообразующая ассоциация силикатных минералов в этих метапелитах *биотит+плагиоклаз+кварц* – это потенциальный субстрат для образования гранатсодержащих гранитоидных магм при анатексисе [14], тогда как карбонаты в этих породах могут служить источником CO_2 , впоследствии сопровождавшего эти магмы [5]. Нижнее значение $\delta^{13}\text{C}$, выше приведенного интервала $\delta^{13}\text{C}$, схоже с изотопным составом углерода карбонатов из метаультрабазита 17-6 (табл. 1, рис. 2). Это указывает на то, что флюиды, высвобождавшиеся при метаморфизме ультраосновных пород зеленокаменных поясов, также участвовали в образовании гранитоидных магм, вероятно, в подошве гранулитового комплекса в ходе его взаимодействия с кратоном. Таким образом, полученные изотоп-

ные данные подтверждают вывод, сделанный прежде нами на основе изучения уникальных магнетитсодержащих включений в гранатах лейкократовых гранитоидов ЮКЗ [15].

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-17-00206, частично в рамках темы АААА-А18-118020590148-3 государственного задания ИЭМ РАН на 2019–2021 гг., а также в рамках сотрудничества с Университетом Йоханнесбурга (ЮАР). Использованные методы исследований стабильных изотопов разработаны и поддерживаются в рамках государственного задания ИГМ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Santosh M., Omori S. // *Gondwana Research*. 2008. V. 13. P. 86–102.
2. Bohlen S., Mezger K. // *Science*. 1989. V. 244. P. 326–329.
3. Van Reenen D.D., Smit C.A., Perchuk A.L., Huizenga J.M., et al. // In A. Kröner and A. Hofmann (eds.), *The Archaean Geology of the Kaapvaal Craton, Southern Africa, Regional Geology Reviews*, Springer Nature. 2019. P. 185–224.
4. Van Schalkwyk J.F., Van Reenen D.D. // *Precam. Res.* 1992. V. 55. P. 337–352.
5. Safonov O.G., Reutsky V.N., Varlamov D.A., et al. // *Gondwana Res.* 2018. V. 60. P. 129–152.
6. Vennemann T.W., Smith H.S. // *Precam. Res.* 1992. V. 55. P. 365–397.
7. Sarangi S., Sarkar A., Srinivasan R., et al. // *J. Asian Earth Sci.* V. 52. P. 1–11.
8. McCourt S., Van Reenen D.D. // *Precam. Res.* 1992. V. 55. P. 93–110.
9. Perchuk L.L., Gerya T.V., Van Reenen D.D., et al. // *Mineral. Petrol.* 2000. V. 69. P. 109–142.
10. Kyser T.K. // In: Valley J.W., Taylor H.P., O'Neil J.R. (Eds.), *Stable Isotopes in High Temperature Geological Processes*. Book-Crafters, Chelsea, MI. 1986. P. 141–164.
11. Groves D.I., Golding S.D., Rock N.M.S., et al. // *Nature*. 1988. V. 331. P. 254–257.
12. Kim S.-T., O'Neil J.R. // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1997. V. 61. P. 3461–3475.
13. Shields G., Veizer J. // *Precambrian Marine Carbonate Isotope Database: Version 1.1* // *Geochem. Geophys. Geosys. (G3)*. 2002. V. 3. P. U1–U12.
14. Weinberg R.F., Hasalová // *Lithos*. 2015. V. 212–215. P. 158–188.
15. Safonov O.G., Mityaev A.S., Yapaskurt V.O., et al. // *Gondwana Res.* 2020. V. 77. P. 147–167.

**ISOTOPE CHARACTERISTICS OF CARBONATES FROM ROCKS
OF GREENSTONE BELTS AS AN INDICATOR OF THE POSSIBLE SOURCE
OF FLUIDS IN THE PRECAMBRIAN GRANULITE COMPLEXES:
AN EXAMPLE FROM THE GIYANI GREENSTONE BELT
AND THE LIMPOPO GRANULITE COMPLEX, SOUTH AFRICA**

**A. S. Mityaev^{a,b,#}, O. G. Safonov^{a,b,d}, V. N. Reutsky^c, O. P. Izokh^c, D. A. Varlamov^a, V. M. Kozlovskii^e,
D. D. van Reenen^d, and Corresponding Member of the RAS L. Y. Aranovich^{e,a}**

^a *Korzhinskii Institute of Experimental Mineralogy, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka,
Moscow Region, Russian Federation*

^b *Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

^c *Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

^d *University of Johannesburg, Johannesburg, South Africa*

^e *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: classic_ten@mail.ru*

Paper presents data on the carbon and oxygen isotopic composition of carbonates from the rocks of the Giyani greenstone belt, Kaapvaal craton, South Africa. This belt is directly juxtaposed to the Hout River shear zone (HRSZ), along which the South Marginal Zone (SMZ) of the Limpopo granulite complex has been thrust over the Kaapvaal craton. The $\delta^{13}\text{C}$ values for carbonates from two metapelite samples are -2.1 and -2.2‰ , for carbonates from a meta-ultrabasite sample is -5.1‰ , and carbonates from two metabasite samples are -7.1 and -7.7‰ , respectively. The $\delta^{18}\text{O}$ values are 17.1 and 17.5‰ for carbonates from the metapelites, 14.3‰ for carbonates from the meta-ultrabasite, 12.9 and 13.0‰ for carbonates from the metabasites. Comparison of the obtained data with the published data on the isotopic composition of carbonates from rocks of different greenstone belts indicates both hydrothermal (in metabasites and metaultrabasite) and sedimentary (in metapelites) origin of the carbonate material in the studied rocks. Based on a comparison of these data with $\delta^{13}\text{C}$ of magnesite that formed in ultrabasic granulites during the interaction of the Limpopo complex with the craton, graphite and fluid inclusions in leucocratic garnet-bearing granitoids that transported fluids, and carbon isotope composition of graphite from metapelites of the SMZ, it was concluded that the carbon source was located outside the SMZ and was related to heterogeneous carbonate-bearing lithologies. They could be carbonate-bearing volcanogenic-sedimentary sequences of the greenstone belts of the Kaapvaal craton, which experienced prograde metamorphism during interaction with the SMZ granulites.

Keywords: carbon isotopic, fluids, greenstone belts, Limpopo complex, carbonates, archaean