

## Кристаллохимические, минералогические и геохимические особенности доломитов авзянской свиты среднего рифея (Южный Урал)

©2023 Р. Р. Ахмедова<sup>1✉</sup>, С. В. Мичурин<sup>1</sup>, Е. О. Шиянова<sup>2</sup>, Н. Д. Сергеева<sup>1</sup>, А. А. Шарипова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН,  
ул. Карла Маркса, 16/2, 450077, Уфа, Российская Федерация  
<sup>2</sup>ООО РН-БашНИПИнефть, 450008, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 30/1

### Аннотация

**Введение:** Определены кристаллохимические характеристики и причины их вариаций в слабо- и сильноизмененных эпигенетическими процессами доломитах авзянской свиты среднего рифея Башкирского мегантиклинория.

**Методы:** Рентгенография, рентгенофлуоресцентный анализ, электронная микроскопия с энергодисперсионным микроанализом.

**Результаты и обсуждения:** В доломитах авзянской свиты фиксируются повышенные параметры кристаллической решетки ( $a_{cp}=4.8105 \text{ \AA}$ ,  $c_{cp}=16.0211 \text{ \AA}$ ) и пониженные значения субструктурного рефлекса ( $K_{cp}=0.66$ ) по сравнению со стехиометрическими доломитами. Средние содержания Fe (II) равны 4545 г/т, Mn – 423 г/т, Sr – 124 г/т. Увеличение параметров кристаллической решетки доломитов авзянской свиты прямо коррелирует с ростом содержаний Fe и Mn, а значения субструктурного рефлекса имеют с ними обратную связь. В породах всех изученных разрезов обнаружено присутствие двух генераций доломита и кальцита. Образование кальцит-доломитовых прожилков происходило при температурах 260–530°C и давлениях 0.3–2.3 кбар. В доломитах разных подсвит средние значения параметров кристаллической решетки  $a$  и  $c$  уменьшаются от ранне- (катакская подсвита) к позднеавзянским (тюльменская подсвита). В этом же направлении увеличиваются средние значения коэффициента  $K$  упорядочения структуры доломитов.

**Заключение:** Доломиты разных стратиграфических уровней авзянской свиты подвержены интенсивным эпигенетическим преобразованиям, обусловленным воздействием на породы Fe- и Mn-содержащих средне- и высокотемпературных флюидов. Изменение кристаллохимических характеристик доломитов авзянской свиты связаны не столько с процессами регионального метаморфизма, сколько с деятельностью постмагматических (разрезы у с. Веселовка и на р. Тюльмень) и катагенетических (разрезы у д. Исламбаево и на р. Б. Авзян) флюидов, циркуляция которых происходила по зонам разрывных нарушений.

**Ключевые слова:** доломиты, авзянская свита, кристаллохимические характеристики, Башкирский мегантиклинорий, Южный Урал.

**Источник финансирования:** работа выполнена в рамках Государственного задания ИГ УФИЦ РАН № FMRS-2022-0015 и № FMRS-2022-0013.

**Для цитирования:** Ахмедова Р. Р., Мичурин С. В., Шиянова Е. О., Сергеева Н. Д., Шарипова А. А. Кристаллохимические, минералогические и геохимические особенности доломитов авзянской свиты среднего рифея (Южный Урал) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2023. № 3. С. 40–56. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/3/40-56>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Ахмедова Регина Равил кизи, e-mail: [delmukhametovar@mail.ru](mailto:delmukhametovar@mail.ru)

## **Введение**

Авзянская свита в Башкирском мегантиклинории на Южном Урале завершает юрматинскую серию среднего рифея. Свита является одним из наиболее интересных подразделений типового разреза рифея, как с седиментологической и палеогеографической, так и с металлогенической точек зрения [1, 2]. Породы авзянской свиты являются рудовмещающими для многих полезных ископаемых – месторождений и проявлений железа, полиметаллов, магнетита, барита и других. Их формирование связывают с разгрузкой нагретых элизионных катагенетических растворов и относят к гидротермально-метасоматическим литогенным образованиям [2].

Мощность свиты составляет около 2000 м, из которых более двух третей приходится на долю карбонатных пород, преимущественно доломитов и в меньшей степени известняков. Накопление осадочных отложений свиты происходило в позднем мезопротерозое во время перестройки изотопного углеродного цикла Земли и наименее затронутые эпигенетическими процессами доломиты и известняки свиты сохранили первичный С-изотопный сигнал, что используется для глобальных хемотратиграфических построений [3].

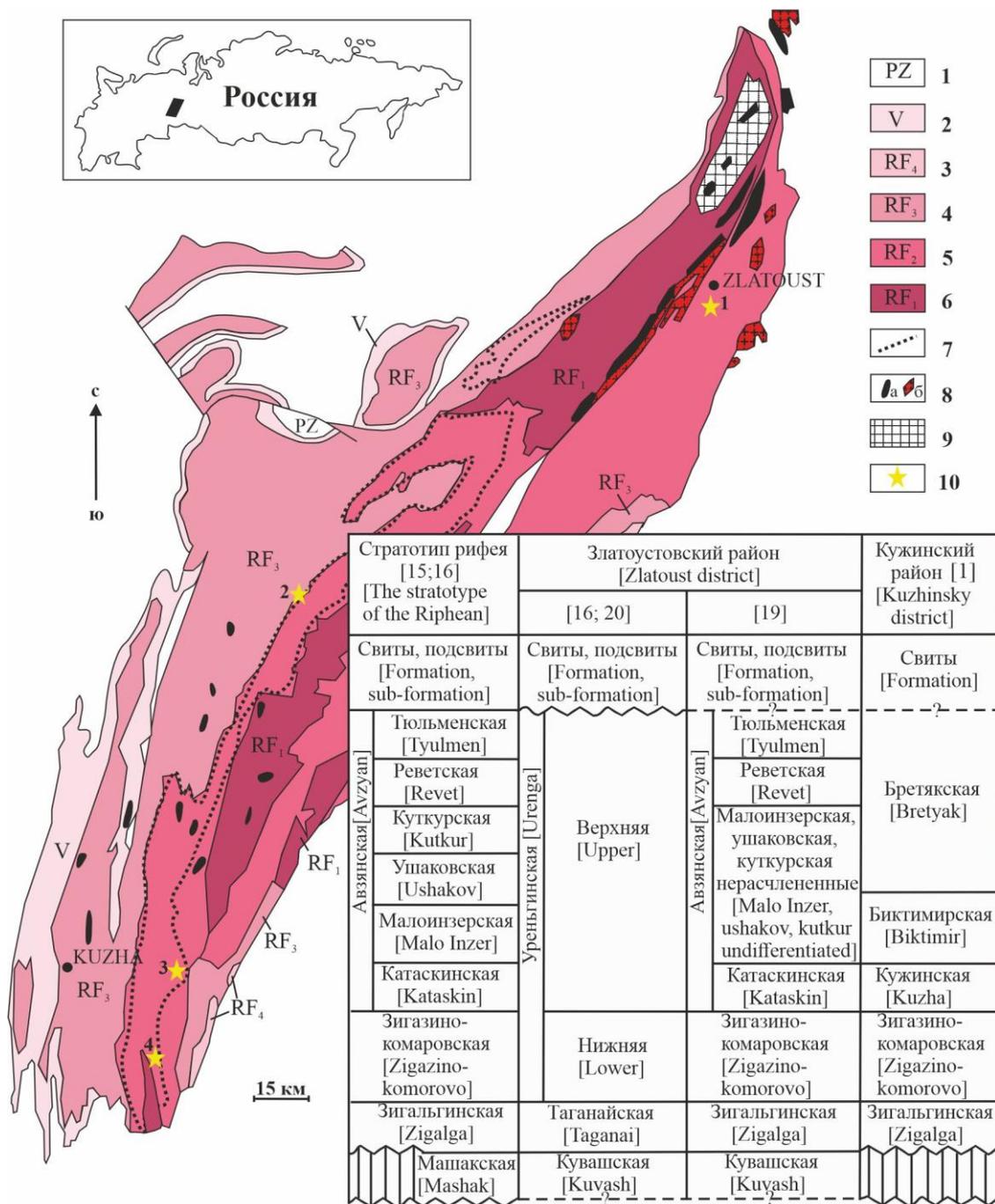
Все перечисленные факторы заставляют исследователей внимательно подходить к анализу большого круга вопросов, связанных с изучением авзянской свиты [2]. Нами для изучения доломитов авзянской свиты привлечен метод порошковой дифрактометрии. Как показывают рентгенографические исследования [4–7], неупорядоченное изоморфное замещение магния катионами Fe, Ca, Mn, Zn в природных доломитах приводит к значительным искажениям их кристаллической решетки. Перекристаллизация в результате метаморфо-метасоматических процессов доломитов осадочного происхождения сопровождается структурной перестройкой, что отражается на дифрактограммах диффузностью и снижением интенсивности базальных и сверхструктурных рефлексов [8]. Причины и степень изоморфных замещений могут быть разными, вследствие чего доломиты различного происхождения характеризуются отличающимися кристаллохимическими особенностями. Данные рентгенографических исследований привлекаются для выявления доломитов органической или хемогенной природы [9, 10], отличия эпигенетических доломитов от осадочных [8, 11], выяснения генетических особенностей различных генераций доломитов в рудных месторождениях [12, 13]. В настоящей работе предпринимается попытка оценить степень различия кристаллохимических характеристик в слабо- и сильноизмененных эпигенетическими процессами авзянских доломитах, а также определить, какими причинами обусловлены вариации этих параметров. Для оценки уровня постседиментационных изменений доломитов привлекаются данные проведенного петрографического, минералогического и геохимического изучения.

## **Стратиграфия и литология авзянской свиты**

Отложения среднерифейской юрматинской серии широко распространены на крыльях Башкирского мегантиклинория (рис. 1) и в стратотипическом разрезе расчленены на 4 свиты: вулканогенную и вулканогенно-осадочную машакскую (мощность 2500–3100 м), песчаниковую зигальгинскую (250–400 м), терригенную зигазино-комаровскую (1000–1200 м) и терригенно-карбонатную авзянскую (1500–2000 м) [14, 15]. Возрастной интервал отложений юрматиния составляет в 1400 – 1030 млн лет [14, 16]. Для отложений авзянской свиты пока нет точного определения времени накопления, а имеющиеся датировки 1226 млн лет (K-Ag данные по глаукониту [15]) и ~1270 млн лет (данные хемотратиграфии [3]) признаются не надежными [17, 18].

Авзянская свита в типовом разрезе расчленена на 6 подсвит (снизу вверх): катаскинскую, малоинзерскую, ушаковскую, куткурскую, реветскую и тюльменскую [2, 15, 19]. Катаскинская подсвита (мощность 200–600 м) сложена известняками, доломитами с прослоями и линзами строматолитов и с подчиненными прослоями низкоуглеродисто-глинистых сланцев и алевролитов, малоинзерская (150–250 м) – алевролитами, сланцами, песчаниками, содержащими прослой карбонатных пород со строматолитами, ушаковская (30–100 м) – доломитами и доломитизированными известняками с большим количеством строматолитов и микрофитолитов, куткурская (150–250 м) – пестроокрашенными сланцами с прослоями песчаников, реветская (400–500 м) – доломитами и доломитизированными известняками, содержащими строматолиты и микрофитолиты, с редкими прослоями и линзами кремней, тюльменская (50–300 м) – алевролитами, песчаниками, сланцами и глинистыми доломитами.

Отложения юрматинской серии в разных структурно-геологических зонах Башкирского мегантиклинория испытывают фациальные изменения. В его северо-восточной части в Златоустовском районе (см. рис. 1, точка 1) породы значительно метаморфизованы и здесь выделяют кувашскую, таганайскую и уреньгинскую свиты [16, 20]. Они сопоставляются соответственно с машакской, зигальгинской и объединенными зигазино-комаровской и авзянской свитами типового разреза рифея. Вместе с тем степень метаморфизма пород по их простирацию в этом районе увеличивается постепенно, поэтому определить границу между различно метаморфизованными образованиями сложно. Местами в них сохраняются реликтовые структуры, и по стратиграфическому положению и литологическому составу отложения Златоустовского района хорошо сопоставляются с аналогичными отложениями машакской, зигальгинской, зигазино-комаровской и авзянской свит стратотипического разреза рифея, что было показано в работе [19]. В полосе распространения уреньгинской свиты уверенно прослеживаются, как отложения зигазино-комаровской свиты, так и отложения авзянской свиты, которая представлена графитсодержащими сланцами с прослоями и пачками



**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта Башкирского мегантиклинория (Южный Урал), корреляция стратиграфических подразделений юрматинской серии среднего рифея и места отбора образцов доломитов авзянской свиты. Приводится по [1, 2, 14–16, 19, 20] с дополнениями и изменениями. Условные обозначения: 1 – палеозой; 2 – венд; 3–6 – рифей: 3 – терминальный; 4 – верхний; 5 – средний; 6 – нижний; 7 – контур распространения неметаморфизованных отложений авзянской свиты; 8 – магматические породы: габбродолериты (а) и граниты (б); 9 – тараташский метаморфический комплекс (AR–PR<sub>1</sub>); 10 – положение изученных разрезов авзянской свиты: 1 – катаскинской подсвиты у с. Веселовка; 2 – тюльменской подсвиты на р. Тюльмень; 3 – реветской подсвиты на р. Б. Авзян; 4 – кужинской свиты (стратиграфический аналог катаскинской подсвиты) у д. Исламбаево.

**[Fig. 1.** Schematic geological map of the Bashkir meganticlinorium (Southern Urals), correlation of stratigraphic units of the Jurmatian series of the Middle Riphean and the sampling site of the dolomites of the Avzyan formation. Is given according to [1; 2; 14–16; 19, 20] with additions and changes. Legend: (1) – Paleozoic; (2) – Vendian; (3–6) – Riphean: (3) – terminal; (4) – upper; (5) – middle; (6) – lower; (7) – distribution contour of non-metamorphosed deposits of the Avzyan formation; (8) – igneous rocks: gabbrodolerites (a) and granites (b); (9) – Taratash metamorphic complex (AR–PR<sub>1</sub>); (10) – the position of the studied sections of the Avzyan formation: (1) – the Kataskin sub-formation near the village of Veselovka; (2) – the Tyulmen sub-formation on the Tyulmen River; (3) – the Revet sub-formation on the B. Avzyan River; (4) – the Kuzha formation (stratigraphic analogue of the Kataskin sub-formation) near the village Islambayevo.]

доломитов, доломитизированных известняков и мраморов. По сравнению с предшественниками в работе [19] приводится более детальное расчленение авзянской свиты на подсвиты: катаскинскую, объединенные малоинзерскую, ушаковскую и куткурскую, реветскую, тюльменскую (см. рис. 1). В настоящей статье авторами приняты эти стратиграфические представления.

Вариации литологического и фациального состава характерны для авзянской свиты в Кужинском районе в южной части Башкирского мегантиклинория (см. рис. 1, точка 4). Здесь в качестве ее стратиграфических аналогов выделены кужинская, биктимирская и бретьякская свиты [1]. Верхняя карбонатная часть кужинской свиты сопоставляется с катаскинской подсвитой, терригенная биктимирская и карбонатно-терригенная бретьякская свиты – с малоинзерской, ушаковской и куткурской подсвитами авзянской свиты стратотипического разреза среднего рифея.

### Положение и характеристика разрезов

*Разрез катаскинской подсвиты у с. Веселовка.* Расположен в северо-восточной части Башкирского мегантиклинория (см. рис. 1, точка 1) в 5–10 км восточнее хр. Уреньга. В придорожном карьере протяженностью около 200 м с севера на юг вдоль автодороги на с. Веселовка (в 600 м от поворота с трассы М-5) вскрываются молочно-белые, светло- и желтовато-серые, мраморизованные доломиты, мощностью ~30 м. В нижней части разреза отмечаются прослой кристаллических сланцев, мощностью до 2.5 м. Падение слоистости пород западное и северо-западное  $270\text{--}320^\circ \angle 30\text{--}35^\circ$ . Доломиты прорваны двумя дайками габбродолеритов, мощностью приблизительно 15 и 30 м. В доломитах на контакте с габбродолеритами изредка отмечается обильная сульфидная минерализация, представленная преимущественно сегрегациями крупнокристаллического пирита. В южном окончании разреза наблюдаются выходы гранитов.

*Разрез кужинской свиты у д. Исламбаево.* Расположен в южной части Башкирского мегантиклинория (см. рис. 1, точка 4) в ~5 км на юг-юго-восток от д. Исламбаево на правом берегу р. Малый Нугуш. В придорожной выемке протяженностью около 30 м с северо-востока на юго-запад обнажается слой светло- и темно-серых с сиреневым оттенком массивных («сливных») доломитов, мощностью около 10 м. Стратиграфически доломиты разреза относятся к верхней части кужинской свиты, параллелизуемой с катаскинской подсвитой авзянской свиты [1]. В обнажении доломиты иногда рассланцованы, брекчированы и в них отмечается присутствие разнонаправленных прожилков, мощностью 1–2 мм, выполненных вторичным доломитом и кварцем, а также наблюдаются редкие зерна окисленного пирита размером до 0.1–0.2 мм и его сегрегации размером до 3–5 мм.

*Разрез реветской подсвиты на р. Большой Авзян.* Расположен в южной части Башкирского мегантиклинория (см. рис. 1, точка 3) в пос. Верхний Авзян (разрез «у пекарни») на левом берегу р. Б. Авзян. В разрезе по

данным [21] обнажаются серые, светло-, розовато- и желтовато-серые, тонко-, средне- и грубоплитчатые, тонко- и горизонтально-полосчатые, а также неясно- и волнисто-слоистые доломиты. В разрезе выделены 20 слоев общей мощностью около 250–260 м. В доломитах часто отмечается присутствие строматолитов, преобладающих в верхней части разреза. Здесь же встречаются прослой и линзы кремней. Иногда наблюдается окремнение строматолитов и их частичная перекристаллизация. В средней части разреза описана пачка переслаивания грубоплитчатых массивных доломитов и тонкоплитчатых доломитовых мергелей.

*Разрез тюльменской подсвиты на р. Тюльмень.* Расположен в западной части Башкирского мегантиклинория (см. рис. 1, точка 2) на левом берегу р. Тюльмень у подножия хр. Белягуш. Является стратотипическим разрезом тюльменской подсвиты [15]. В обнажении стратиграфически выше светло-серых доломитов реветской подсвиты залегают красноцветные карбонатные и терригенные породы тюльменской подсвиты, мощностью около 70 м, перекрывающиеся песчаниками зильмердакской свиты верхнего рифея. В разрезе вскрываются светло- и голубовато-серые, розовые, красные, пелитоморфные, плитчатые, глинистые доломиты с прослоями зеленовато-серых, розовых и малиново-красных неяснослоистых кварцевых алевролитов [15]. Завершает разрез тюльменской подсвиты слой темно-серых, черных филлитовидных глинистых и глинисто-кварцевых микросланцев с прослоями алевролитов и песчаников [22]. Осадочные породы разреза прорваны тремя дайками габбродолеритов, мощностью от 2 до 35 м.

### Материалы и методы исследования

Для изучения взято 25 образцов доломитов авзянской свиты, в том числе из катаскинской подсвиты – 10, из кужинской свиты (аналог катаскинской подсвиты) – 4, реветской подсвиты – 5, тюльменской подсвиты – 6. Интервал отбора в разрезах составлял от 0.2 до 10 м, в обнажении реветской подсвиты на р. Б. Авзян – от 5 до 50 м. В разрезах у с. Веселовка и на р. Тюльмень отбор образцов осуществляли как в непосредственной близости к дайкам габбродолеритов, так и на удалении от них до 15 м.

Рентгенографические исследования проводили на дифрактометре ДРОН-4 (аналитик Г.С. Ситдикова) в порошковых пробах навеской 0.5–1 г. Съёмка выполнялась в  $\text{Cu } K_\alpha$  излучении в области брэгговских углов  $2\Theta$   $4\text{--}60^\circ$  с шагом  $0.02^\circ$  и временем счета, равным 10 с. По результатам дифрактометрии определены параметры элементарной ячейки доломитов  $a$  и  $c$ , минералогический состав пород, а также так называемый [4] коэффициент упорядочения структуры  $K$ , представляющий собой отношение интенсивностей субструктурных рефлексов  $I_{01.5}/I_{11.0}$ .

Химический состав доломитов определяли на энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре X-Calibur (Израиль). Для построения калибровочных графиков использовались государственные

стандартные образцы известняков (КН, КН-2, КН-3, ОСО № 469-11), доломитизированных известняков (СИ-2) и доломитов (СИ-1, СИ-3). Предел обнаружения для петрогенных оксидов составлял 0.01–0.2 мас. %, для редких элементов – 5–10 г/т. Содержания FeO по валовым пробам доломитов находили объемным бихроматным титриметрическим методом.

Изучение химического и минералогического состава доломитов выполнено на электронном микроскопе Tescan Vega Compact с энерго-дисперсионным анализатором Xplorer 15 Oxford Instruments (напряжение 20 кВ, ток 4 нА, время накопления 60 с, диаметр пучка ~3 мкм). Анализ проводили в полированных шлифах доломитов.

### Результаты исследования

Геохимические, минералогические и кристаллохимические характеристики. Средний химический и

минералогический составы доломитов из различных разрезов авзянской свиты и средние концентрации в доломитах редких элементов приводятся в таблице 1. В доломитах из разных подсвит средние содержания MgO колеблются от 18.89 до 19.27 мас. %, CaO – от 25.13 до 31.04 мас. %, SiO<sub>2</sub> – от 2.25 до 13.44 мас. %. Среднее количество силикластической примеси изменяются в пределах от 3.76 до 17.03%. Большая часть из измеренных микроэлементов в доломитах находится на кларковом уровне и ниже, исключение представляют Cr, Ni, Y, Zr, Ba, концентрации которых превышают кларк для карбонатных пород в несколько раз. Главным минералом в породах является доломит, средние содержания которого в разных подсвитах варьируют от 78 до 95 %. Породы характеризуются изменчивыми содержаниями кварца, кальцита и микроклина и низкими концентрациями (<1%) слюд (мусковит, биотит), клинохлора и альбита.

**Табл. 1.** Средний химический и минералогический составы доломитов и средние содержания в них редких элементов в разрезах различных подсвит авзянской свиты  
**[Table 1.** Average chemical and mineralogical compositions of dolomites and average contents of rare elements in them in sections of various sub-formations of the Avzyan formation]

Элемент/ Минерал [Element/ mineral]	с. Веселовка [Veselovka village]	д. Исламбаево [Islambaevov village]	р. Б. Авзян [B. Avzyan river]	р. Тюльмень [Tyulmen river]
	Катаскинская (n=10) [Kataskin (n=10)]	Катаскинская (n=4) [Kataskin (n=4)]	Реветская (n=5) [Revet (n=5)]	Тюльменская (n=6) [Tyulmen (n=6)]
1	2	3	4	5
SiO <sub>2</sub>	2.25±0.99	2.79±1.31	7.05±4.72	13.32±5.91
TiO <sub>2</sub>	0.07±0.01	0.03±0.00	0.05±0.02	0.11±0.07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.65±0.19	0.73±0.07	1.39±0.46	2.11±1.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ	1.47±0.44	1.41±0.58	0.63±0.31	0.89±0.29
MnO	0.06±0.03	0.06±0.02	0.04±0.01	0.05±0.00
MgO	19.24±1.29	19.05±0.23	18.89±0.77	18.41±1.39
CaO	31.04±0.66	30.63±0.57	28.31±2.43	25.58±3.53
Na <sub>2</sub> O	0.09±0.04	0.09±0.03	0.09±0.05	0.10±0.09
K <sub>2</sub> O	0.03±0.01	0.01±0.01	0.77±0.53	1.04±1.05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02±0.01	0.02±0.00	0.04±0.02	0.06±0.02
SO <sub>2</sub>	0.02±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.04±0.01
ППП	45.16±1.06	45.58±0.71	42.58±3.31	37.64±4.08
V	<10	<10	<10	21±5
Cr	15±10	19±4	8±7	30±9
Ni	8±2	9±3	10±1	11±1
Zn	6±5	<5	5±4	15±9
Rb	–	9±2	–	26±11
Sr	145±18	78±27	48±8	163±29
Y	5±1	4±1	6±2	8±4
Zr	46±3	41±3	58±33	71±46
Ba	19±15	–	42±47	150±94
Pb	8±6	–	11±4	1±1
Сумма [Sum]	100.09±0.86	100.10±0.50	99.84±0.50	99.32±0.42
СП [SA]	3.76±1.28	4.37±1.14	9.77±5.83	17.03±7.50
Доломит [Dolomite]	94±4	95±2	92±5	78±11
Кальцит [Calcite]	2±3	<1	<1	4±6
Кварц [Quartz]	<1	1±2	3±4	10±4

Продолжение Табл. 1  
[Continued Table 1]

1	2	3	4	5
Слюды [Mica]	1±1	1±1	1±1	1±1
Клинохлор [Clinocllore]	1±1	<1	<1	1±1
Альбит [Albite]	<1	<1	<1	1±1
Микроклин [Microcline]	<1	<1	2±2	4±4

Примечания: Содержания петрогенных оксидов приводятся в мас. %, редких элементов – в г/т, минералов и СП – в %; n – количество проб; прочерк – нет данных; СП – силикластическая примесь (сумма  $\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{P}_2\text{O}_5$ ). Содержания Co и Cu во всех подсвитах находятся ниже предела обнаружения.

[Note: The contents of petrogenic oxides are given in wt. %, rare elements – in g/t, minerals and SP – in %; n – number of samples; dash – no data; SP – siliclastic impurity (sum of  $\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{P}_2\text{O}_5$ ). The Co and Cu contents in all posts are below the detection limit.]

Кристаллохимические характеристики, содержания двухвалентного железа, марганца, стронция и отношения этих элементов в доломитах авзянской свиты приводятся в таблице 2. Параметры элементарной ячейки доломитов варьируют в пределах:  $a$  – от 4.8087 до 4.8125 Å (среднее = 4.8105 Å),  $c$  – от 16.0116 до

16.0282 Å (среднее = 16.0211 Å). Значения коэффициента  $K (I_{01.5}/I_{11.0})$  колеблются от 0.47 до 0.88. Содержания двухвалентного железа составляют 1065–9899 г/т, марганца – 185–981 г/т, стронция – 35–222 г/т. Отношения Mn/Sr и Fe/Sr варьируют в пределах от 1.7 до 9.3 и от 13.5 до 108.8 соответственно.

**Табл. 2.** Параметры элементарной ячейки  $a$  и  $c$ , значения коэффициента  $K (I_{01.5}/I_{11.0})$ , содержания Fe (II), Mn, Sr (г/т) и их отношения в доломитах авзянской свиты  
[Table 2. Parameters of the unit cell  $a$  and  $c$ , values of the coefficient  $K (I_{01.5}/I_{11.0})$ , contents of Fe (II), Mn, Sr (ppm) and their ratios in the dolomites of the Avzyan formation]

№ обр. [Sample №]	$a$ , Å	$c$ , Å	$I_{01.5}/I_{11.0}$	Fe (II)	Mn	Sr	Mn/Sr	Fe/Sr
1	2	3	4	5	6	7	8	9
m2355	4.8112	16.0282	0.62	9899	981	222	4.4	44.6
m2356	4.8125	16.0275	0.60	3891	640	183	3.5	21.3
m2357	4.8113	16.0231	0.71	4941	394	172	2.3	28.7
m2358	4.8113	16.0251	0.60	5217	406	157	2.6	33.2
m2360	4.8108	16.0199	0.73	5821	375	142	2.6	41.0
m2361	4.8114	16.0269	0.58	9231	454	129	3.5	71.6
m2362	4.8102	16.0219	0.55	6626	540	141	3.8	47.0
m2375	4.8115	16.0237	0.67	2220	286	136	2.1	16.3
m2376	4.8106	16.0194	0.63	3342	291	138	2.1	24.2
m2377	4.8105	16.0272	0.48	5026	416	134	3.1	37.5
<b>Ср. по ав1</b>	<b>4.8111</b>	<b>16.0243</b>	<b>0.62</b>	<b>5621</b>	<b>478</b>	<b>155</b>	<b>3.0</b>	<b>36.5</b>
m1110	4.8101	16.0191	0.67	2130	265	35	7.6	60.3
m1112	4.8109	16.0243	0.59	6910	622	70	8.9	99.4
m1114	4.8108	16.0224	0.52	6180	533	57	9.3	108.8
m1115	4.8108	16.0231	0.74	6405	533	85	6.3	66.8
<b>Ср. по ав1*</b>	<b>4.8107</b>	<b>16.0222</b>	<b>0.63</b>	<b>5406</b>	<b>488</b>	<b>62</b>	<b>8.0</b>	<b>83.8</b>
m1140	4.8097	16.0146	0.88	2215	285	63	4.5	35.2
m1142	4.8108	16.0208	0.59	1065	185	79	2.3	13.5
m1143	4.8109	16.0196	0.73	1065	363	72	5.0	14.8
m1144	4.8096	16.0160	0.68	1648	287	51	5.6	32.3
m1145	4.8106	16.0217	0.62	2915	427	49	8.7	59.5
<b>Ср. по ав5</b>	<b>4.8103</b>	<b>16.0185</b>	<b>0.70</b>	<b>1782</b>	<b>309</b>	<b>63</b>	<b>5.2</b>	<b>31.1</b>
m1918	4.8099	16.0156	0.69	5402	403	138	2.9	39.1
m1919	4.8097	16.0178	0.73	4812	369	155	2.4	31.0
m1920	4.8087	16.0116	0.77	5480	399	124	3.2	44.2

Продолжение Табл. 2  
[Continued Table 2]

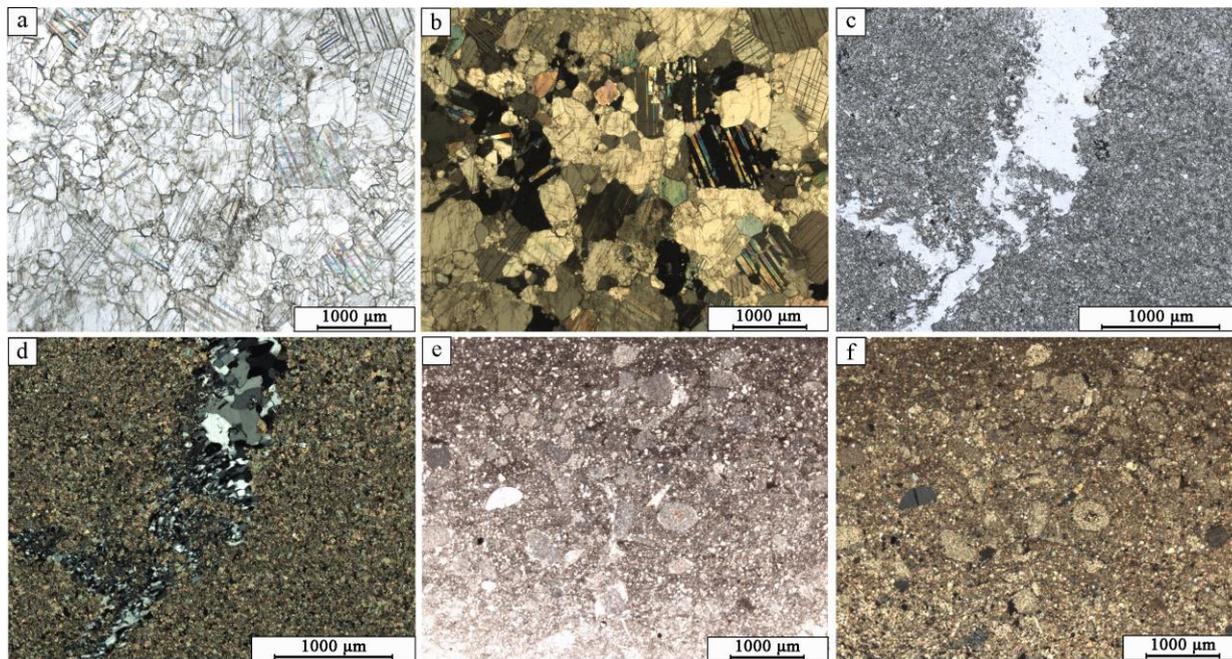
1	2	3	4	5	6	7	8	9
м1925	4.8102	16.0184	0.77	4734	435	173	2.5	27.4
м1926	4.8091	16.0186	0.67	2752	347	202	1.7	13.6
м1927	4.8100	16.0199	0.67	3708	348	184	1.9	20.2
<b>Ср. по ав<sub>6</sub></b>	<b>4.8096</b>	<b>16.0170</b>	<b>0.72</b>	<b>4481</b>	<b>383</b>	<b>163</b>	<b>2.4</b>	<b>29.3</b>

Примечания: Разрезы: м2355–м2377 – ав<sub>1</sub> (с. Веселовка); м1110–м1115 – ав<sub>1</sub>\* (д. Исламбаево); м1140–м1145 – ав<sub>5</sub> (р. Б. Авзян); м1918–м1927 – ав<sub>6</sub> (р. Тюльмень).

[Note: Sections: м2355–м2377 – ав<sub>1</sub> (Veselovka village); м1110–м1115 – ав<sub>1</sub>\* (Islambaevo village); м1140–м1145 – ав<sub>5</sub> (B. Avzyan river); м1918–м1927 – ав<sub>6</sub> (Tyulmen river).]

*Петрографические особенности.* Доломиты катаскинской подсвиты у с. Веселовка имеют гетерогранобластовую (рис. 2 а, б) и гранобластовую структуры и массивную текстуру. Сложены ксенобластовыми зернами доломита субизометричной, редко неправильной формы, размером от 0.08 мм до 2.15 мм, имеющих выраженные швы двойникования и трещины спайности. Доломиты перекристаллизованы. В части зерен отмечаются пойкилитовые включения ранней генерации доломита. Сочленение зерен плотное, преимущественно конформное. На некоторых участках одни зерна корродируют другие. В межкристаллическом пространстве средне-, крупно-

грубокристаллических доломитов часто развиты зерна тонкой и мелкой размерности, а также эпизодически отмечаются прорастания одних кристаллов в другие и встречаются кристаллы с фантомами швов двойникования. В интерстициальном пространстве доломитов участками отмечаются выделения тонкоагрегатного кварца размером до 0.05–0.15 мм и единичные таблитчатые и слабо изогнутые лейсты мусковита, размером до 0.45 мм, расположенные вдоль границ кристаллов доломита. В породах отмечается редкая рассеянная вкрапленность рудного минерала, а также единичные нитевидные трещинки, стенки которых выполнены гидроокислами железа.



**Рис. 2.** Фото шлифов доломитов авзянской свиты: а, б – гетерогранобластовая структура доломитов катаскинской подсвиты из разреза у с. Веселовка (обр. м2362); с, d – тонкокристаллическая структура доломитов реветской подсвиты на р. Б. Авзян (обр. м1145). В шлифе наблюдается перекристаллизованный участок, выполненный вторичным доломитом и кварцем в виде вытянутых кристаллов, ориентированных под углом к направлению прожилка; е, f – реликтовые литокласты плотного микро- и тонкокристаллического доломита в основной массе доломитов тюльменской подсвиты на р. Тюльмень (обр. м1929). а, с, е – фото в проходящем свете; б, d, f – в поляризованном, николи скрещены.

[Fig. 2. Photo of thin sections of dolomites of the Avzyan formation: (a, b) – the heterogranoblastic structure of the dolomites of the Kataskin sub-formation from the section near the village of Veselovka (mod. m2362); (c, d) – the fine-crystalline structure of the dolomites of the Revet sub-formation on the B. Avzyan river (mod. m1145). A recrystallized section made of secondary dolomite and quartz in the form of elongated crystals oriented at an angle to the direction of the vein is observed in the shelf; (e, f) – relict lithoclasts of dense micro- and fine-crystalline dolomite in the bulk of the dolomites of the Tyulmen sub-formation on the Tyulmen River (mod. m1929). (a, c, e) – photos in passing light; (b, d, f) – in polarized, nicoli crossed.]

Доломиты *реветской подсвиты* характеризуются тонкокристаллической структурой и массивной текстурой (рис. 2 *с, d*). Сложены субидiomорфными кристаллами доломита размером до 0.15 мм. Отмечается терригенная примесь полуокатанных, неправильных, вытянутых зерен кварца и полевых шпатов до 5 % с преобладанием первого, размером до 0.05–0.1 мм, а также разноориентированных тонких лейст мусковита до 1–2 %, размером до 0.05 мм по удлинению. Наблюдаются редкие тонкие вкрапленники рудных минералов (пирита?). В тонкокристаллической массе доломитов отмечаются перекристаллизованные участки неправильной, полигональной и прожилковидной форм, которые выполнены идиоморфными ромбовидными кристаллами доломита поздней генерации, размером до 1.3 мм, с хорошими швами двойникования и вторичным кварцем. Наблюдаются единичные волнистые слабо окварцованные прожилки шириной до 0.2 мм, выполненные тесно срастающимися волокнистыми бесцветными агрегатами мусковита поздней генерации и хлорита (?). На перекристаллизованных участках по контуру тонкокристаллических ромбоэдрических кристаллов доломита развиты пленки гидроокислов железа.

Доломиты *тюльменской подсвиты* имеют кристаллическую, реже микро-тонкокристаллическую структуру, массивную и с элементами слоистости текстуры. Сложены субидiomорфными кристаллами размером от <0.005 до 0.08 мм. В породах отмечается терригенная примесь (алевритовая и песчаная) кварца (5–30 %) в виде полуокатанных, угловатых зерен неправильной, удлиненной и субизометричной форм, размером 0.01–0.4 мм. Кварц чистый, без пойкилитовых включений, с однородным погасанием. Кроме того, редко наблюдаются окварцованные участки неправильной, извилистой, линзовидной форм, сложенные по краям микро-, тонкокристаллическим кварцем, а в центральной части

– тонкокристаллическим доломитом. В породах встречаются (до 0.5 %) бесцветные разноориентированные тонкие лейсты мусковита, размером до 0.05 мм по удлинению, а также очень редко – лейсты аннита, слабо плеохроирующего в коричневатых тонах. Рудный минерал представлен пиритом в виде вкрапленников правильной кубической формы размером до 0.12 мм. Породы ожелезнены. Гидроокислы (гетит) и окислы (гематит) железа развиты в виде тонкой рассеянной вкрапленности и невыдержанных извилистых полос, а также вблизи пирита и часто по пустотам. Кроме того, в породах нередко отмечаются субпараллельные, разветвляющиеся и взаимно пересекающиеся прожилки шириной до 1.2 мм, выполненные кристаллическим доломитом, вблизи которых гидроокислы железа иногда образуют ореолы рассеяния. В основной массе ожелезненного микрокристаллического доломита часто присутствуют скопления литокластов не ожелезненного микро- и тонкокристаллического доломита овальной, удлиненной и неправильной форм, размером до 0.5 мм (рис. 2 *е, f*).

*Минералогические особенности.* По результатам электронной микроскопии (табл. 3, рис. 3) в породах всех изученных разрезов установлено присутствие двух генераций доломита и кальцита, в которых доломит различается по уровню содержания железа и марганца, а кальцит вместе с тем и по степени магниальности. По доломит-кальцитовому геотермобарометру [23] температуры и давления образования кальцит-доломитовых прожилков в породах авзянской свиты составляют 260–530°C и 0.3–2.3 кбар (см. табл. 3). В породах часто встречается вкрапленность пирита и гидроксидов железа. В разрезе катаскинской подсвиты у с. Веселовка в ассоциации с кальцитом-2 установлен железисто-магниальный хлорит (см. рис. 3), температура образования которого по хлоритовому геотермометру [24, 25] составляет 300–330°C.

**Табл. 3.** Химический состав разных генераций доломита и кальцита, температура и давление их образования в породах авзянской свиты  
**[Table 3.** Chemical composition of different generations of dolomite and calcite, temperature and pressure of their formation in the rocks of the Avzyan formation]

	№ обр. [Sample №]	Генерация минерала [Mineral generation]	MgO	CaO	FeO	MnO	T, °C	P, кбар [P, kbar]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ав1	m2355	доломит-1 (4) [dolomite-1]	19.39	31.10	1.11	<0.01	260–480	0.3–1.7
		доломит-2 (8) [dolomite-2]	17.34	30.11	4.37	0.56		
		кальцит-2 (17) [calcite-2]	0.36	55.04	0.35	0.23		
	m2356	доломит-1 (13) [dolomite-1]	20.19	30.55	0.97	<0.01		
		кальцит-1 (25) [calcite-1]	1.50	54.1	0.47	0.19		
		кальцит-2 (8) [calcite-2]	0.46	54.45	0.18	0.08		

Продолжение Табл. 3  
[Continued Table 3]

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>av<sub>1</sub></i> *	m1110	доломит-1 (10) [dolomite-1]	20.38	30.73	0.42	0.01	530	0.7
	m1114	доломит-1 (5) [dolomite-1]	20.79	31.58	0.31	<0.01		
		доломит-2 (8) [dolomite-2]	18.79	30.24	3.09	0.18		
		кальцит-1 (6) [calcite-1]	1.69	53.37	0.25	0.04		
<i>av<sub>5</sub></i>	m1142	доломит-1 (18) [dolomite-1]	20.30	31.35	0.08	<0.01	350	0.3
	m1145	доломит-1 (6) [dolomite-1]	20.44	30.74	0.27	0.03		
		доломит-2 (14) [dolomite-2]	19.50	30.73	1.70	0.17		
		кальцит-1 (9) [calcite-1]	0.84	54.25	0.10	<0.01		
<i>av<sub>6</sub></i>	m1917	доломит-2 (10) [dolomite-2]	20.83	30.12	0.52	0.03	290	2.3
	m1929	доломит-1 (2) [dolomite-1]	21.85	30.91	<0.01	<0.01		
		кальцит-1 (2) [calcite-1]	0.41	55.17	<0.01	<0.01		
	m1930	доломит-1 (6) [dolomite-1]	20.83	30.80	0.12	<0.01		
		доломит-2 (7) [dolomite-2]	20.38	30.89	0.46	0.02		
		кальцит-1 (13) [calcite-1]	0.51	54.61	0.24	0.12		

Примечания: *av<sub>1</sub>* – катаскинская подсвита (с. Веселовка); *av<sub>1</sub>*\* – кужинская свита (аналог катаскинской подсвиты) (д. Исламбаево); *av<sub>5</sub>* – реветская подсвита (р. Б. Авзян); *av<sub>6</sub>* – тюльменская подсвита (р. Тюльмень). В скобках – количество анализов. Содержания петрогенных оксидов приводятся в мас. %. Температура и давление рассчитаны по [23].

[Note: *av<sub>1</sub>* – Kataskin sub-formation (Veselovka village); *av<sub>1</sub>*\* – Kuzha formation (analogue of Kataskin sub-formation) (Islambaevovillage); *av<sub>5</sub>* – Revet sub-formation (B. Avzyan river); *av<sub>6</sub>* – Tyulmen sub-formation (Tyulmen river). In parentheses – the number of analyses. The contents of petrogenic oxides are given in wt. %. Temperature and pressure are calculated according to [23].]

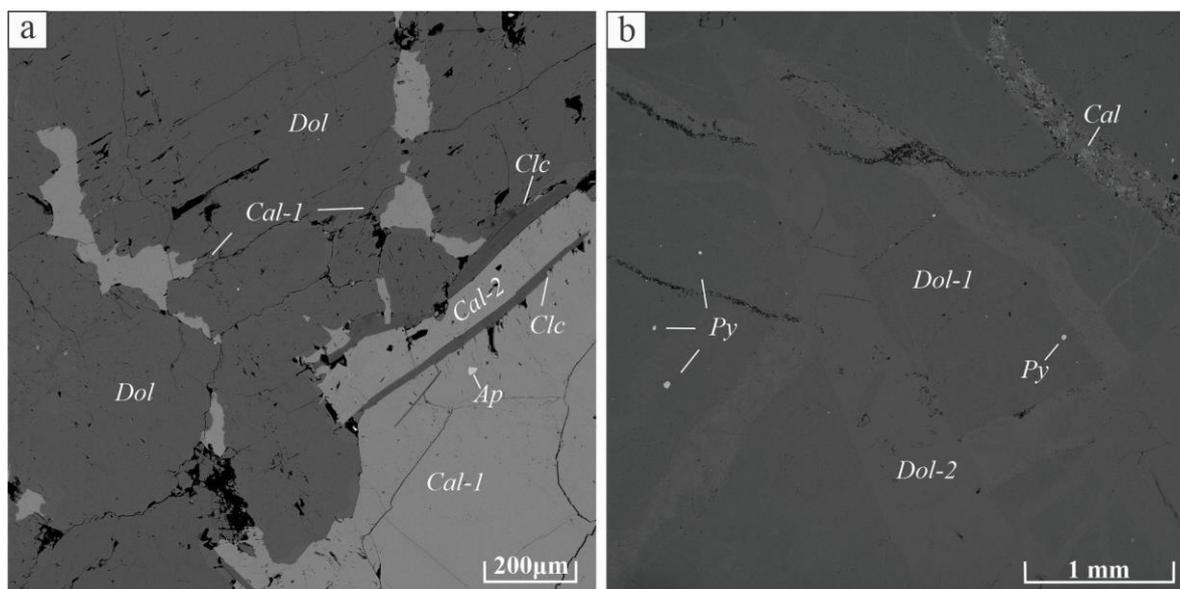
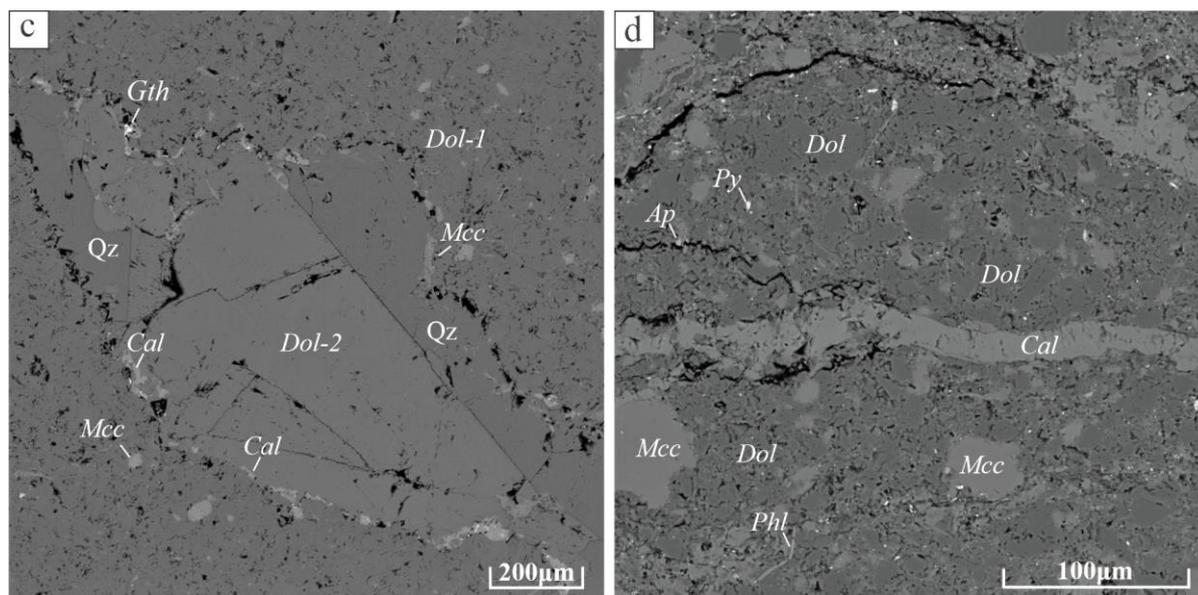


Рис. 3. Доломиты авзянской свиты на BSE-изображениях: а – две генерации кальцита в доломите, с кальцитом-2 ассоциирует клинохлор (катаскинская подсвита, с. Веселовка, обр. м2356); б – кальцитовый прожилок и разнонаправленные метасоматические (?) полосовидные участки доломитов-1 и 2 с разным уровнем содержания Fe и Mn, рассеянная вкрапленность пирита (кужинская свита, д. Исламбаево, обр. м1114);



**Рис. 3.** Доломиты авзянской свиты на BSE-изображениях: *c* – участок развития доломита-2 с кварц-кальцитовой оторочкой в доломите-1 с вкрапленниками обломочного КПШ (реветская подсвита, р. Б. Авзян, обр. м1145); *d* – кальцитовый прожилок в доломите с вкрапленниками КПШ, по трещинам и вблизи них развивается вкрапленность пирита и гидроокислов железа (тюльменская подсвита, р. Тюльмень, обр. м1930).

[**Fig. 3.** Dolomites of the Avzyan formation in BSE images: (*a*) – two generations of calcite in dolomite, clinoclhor associates with calcite-2 (Kataskin sub-formation, Veselovka village, sample m2356); (*b*) – calcite veins and multidirectional metasomatic (?) band-shaped areas of dolomites-1 and 2 with different levels of Fe and Mn, scattered pyrite inclusions (Kuzha formation, Islambaevov village, model m1114); (*c*) – the development site of dolomite-2 with quartz-calcite edging in dolomite-1 with inclusions of detrital CPS (Revet sub-formation, B. Avzyan river, sample m1145); (*d*) – calcite veins in the dolomite with inclusions of CPSH, along the cracks and near them develops inclusions of pyrite and iron hydroxides (Tyulmen sub-formation, Tyulmen river, sample m1930).]

### Обсуждение результатов

**Причины изменения кристаллохимических характеристик.** В доломитах авзянской свиты фиксируются повышенные параметры кристаллической решетки ( $a_{cp}=4.8105 \text{ \AA}$ ,  $c_{cp}=16.0211 \text{ \AA}$ ) и пониженные значения субструктурного рефлекса ( $K_{cp}=0.66$ ) (см. табл. 2) по сравнению со стехиометрическими доломитами. В последний параметр  $a$  находится в пределах  $4.803\text{--}4.807 \text{ \AA}$ , параметр  $c$  –  $15.984\text{--}16.006 \text{ \AA}$  [26], а значения отношения  $I_{01.5}/I_{11.0}$  близки к 1 [4, 8, 9]. Только единичные образцы тюльменской и реветской подсвит по параметру  $a$  ( $4.809 \text{ \AA}$ ) сходны со стехиометрическими доломитами.

Результаты проведенного изучения показывают, что доломиты разных стратиграфических уровней авзянской свиты подвержены эпигенетическим преобразованиям. Для оценки их степени нами использованы геохимические критерии. Считается [27–29 и ссылки в этих работах], что не высокие концентрации Fe и Mn, отсутствие корреляции между ними и низкие значения их отношений ( $Fe/Mn \leq 15$  на  $Fe/Sr \leq 15$ ) отвечают геохимическим критериям «сохранности» доломитов.

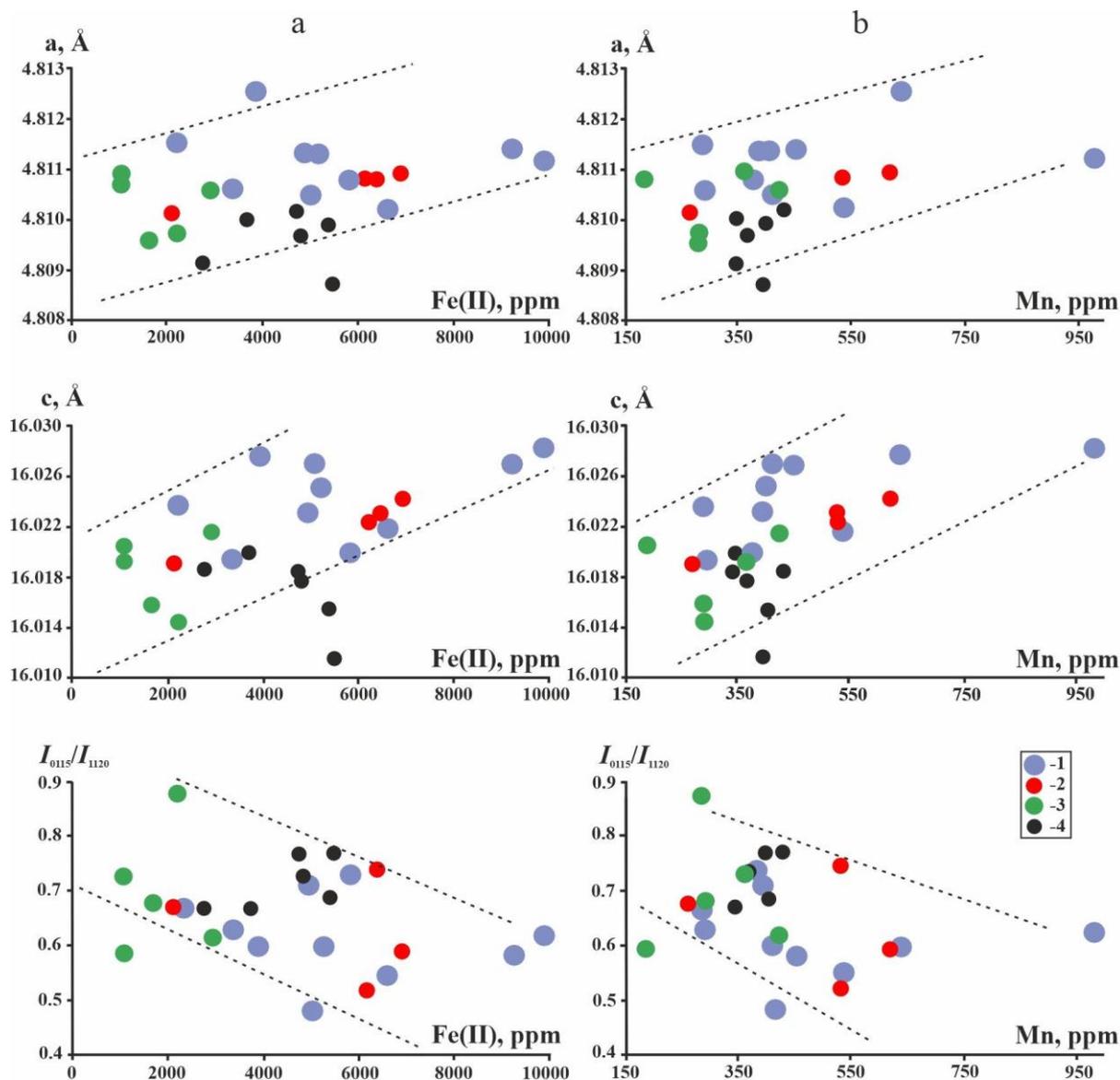
В доломитах авзянской свиты средние содержания Fe (II) равны  $4545 \text{ г/т}$ , Mn –  $423 \text{ г/т}$ , Sr –  $124 \text{ г/т}$ , а средние отношения Mn/Sr и Fe/Sr –  $4.1$  и  $41.3$  соответственно (см. табл. 2). Наши результаты соответствуют аналогичным данным по авзянским доломитам, приводимым в работе [3]. Согласно представлениям указан-

ных авторов, доломиты авзянской свиты с концентрациями Fe и Mn соответственно не выше  $12000$  и  $500 \text{ г/т}$  являются наименее измененными постседиментационными преобразованиями. В большинстве исследованных нами образцов доломитов содержания этих катионов не превышают обозначенных пределов, однако, между ними фиксируется высокая прямая корреляция ( $K_{корр}=0.78$ ), что характерно для перекристаллизованных карбонатных пород. На это же указывают очень высокие значения отношения Fe/Sr в авзянских доломитах, иногда значительно (в 5–6 раз) превышающие величину Fe/Sr геохимического критерия «сохранности», а также данные петрографического изучения.

Во всех разрезах в породах фиксируются участки развития крупнокристаллического доломита поздней генерации, образование кальцит-доломитовых прожилков, часто окварцованных, и увеличение в них размерности зерен доломитов. Все это свидетельствует о проявленных процессах перекристаллизации. Следует отметить при этом, что часто во всех разрезах в поздней генерации доломитов по сравнению с ранней увеличиваются концентрации Fe и Mn (см. табл. 3), а по контуру и вблизи перекристаллизованных участков развиваются гидроокислы железа. Это говорит о том, что растворы, которые участвовали в процессе перекристаллизации, были насыщены Fe и Mn. Согласно вышеприведенным термобарометрическим оценкам, образование кальцит-доломитовых прожилков в доломитах авзянской свиты происходило при средних и

высоких температурах и значительных давлениях, достигающих соответственно 530°C и 2.3 кбар (см. табл. 3). Таким образом, приведенные материалы позволяют говорить о том, что породы авзянской свиты были подвержены интенсивным эпигенетическим преобразованиям, обусловленным воздействием на породы Fe- и Mn-содержащих средне- и высокотемпературных флюидов. По нашему мнению, именно с этим процессом связано изменение кристаллохимических характеристик доломитов авзянской свиты, поскольку в них содержания Fe и Mn прямо коррелируют с увеличением параметров кристаллической решетки и имеют обратную связь с величиной субструктурного рефлекса (рис. 4).

Хорошо известно [4–7, 26], что наличие в доломитах железа, марганца, а также избыточного кальция в позициях магния, приводит к увеличению параметров кристаллической решетки доломитов вследствие большего ионного радиуса  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  по сравнению с  $Mg^{2+}$ . Вместе с тем, установленная связь между содержаниями Fe и Mn и изменениями их кристаллохимических характеристик в авзянских доломитах является не такой простой. При детальном анализе диаграммы (см. рис. 4) видно, что в доломитах из некоторых разрезов фиксируется обратная зависимость между этими параметрами, а положительная корреляция проявляется только, если рассматривать всю совокупность полученных данных.



**Рис. 4.** Зависимость между параметрами кристаллической решетки, коэффициентом упорядочения структуры  $K(I_{015}/I_{110})$  доломитов и содержаниями в них Fe (II) (а) и Mn (б): 1 – катакская подсвита (с. Веселовка); 2 – кужинская свита (аналог катакской подсвиты, д. Исламбаево); 3 – реветская подсвита (р. Б. Авзян); 4 – тюльменская подсвита (р. Тюльмень).

[Fig. 4. Relationship between crystal lattice parameters and structure ordering coefficient  $K(I_{015}/I_{110})$  of dolomites and their Fe (II) (a) and Mn (b) contents: (1) – Kataskin sub-formation (Veselovka village); (2) – Kuzha formation (analog of Kataskin sub-formation, Islambaev village); (3) – Revet sub-formation (B. Avzyan river); (4) – Tyulmen sub-formation (Tyulmen river).]

Объяснением этому могут быть две причины. С одной стороны, присутствие в породах двух генераций доломита с резко различным содержанием Fe и Mn обуславливает неравномерное распределение этих катионов в доломитах, что может приводить к разбросу фигуративных точек на диаграмме. С другой стороны, не исключено, что в доломитах авзянской свиты также присутствуют избыточные содержания Са, которые, как известно [4, 6], приводят к таким же эффектам на дифрактограммах доломитов, что и повышенные содержания Fe.

Согласно исследованиям [5, 30–32] большинство разновозрастных природных доломитов содержат избыток Са и состоят из двух или даже трех фаз, различающихся степенью поглощения избытка Са и степенью структурного порядка. По мнению Джулии Бартли с соавторами [3], доломиты авзянской свиты были подвержены перекристаллизации на стадии раннего диагенеза и представляют собой Са-доломиты.

Считается [26], что параметры кристаллической решетки доломитов не чувствительны к содержаниям в них избыточного  $\text{CaCO}_3$  до 2.5 мол. %. Расчеты, проведенные нами с использованием эмпирической зависимости между значениями коэффициента  $K$  и концентрацией избыточного кальцита в доломитах [4], показывают, что количество избыточного  $\text{CaCO}_3$  в большинстве образцов катаскинского и реветского уровней превышает этот порог и варьирует от 2.5 до 3.9 мол. %. Для всех исследованных доломитов авзянской свиты это количество в среднем составляет 2.7 мол. %. Вместе с тем отметим, что эти расчеты выполнены без учета влияния содержания железа.

*Природа Fe- и Mn-содержащих эпигенетических флюидов.* По результатам исследований установлено, что в разных подсвитах средние значения параметров кристаллической решетки  $a$  и  $c$  уменьшаются от ранне- (катаскинская подсвита) к позднеавзянским (тюльменская подсвита) доломитам (см. табл. 2). В этом же направлении увеличиваются средние значения коэффициента  $K$  упорядочения структуры доломитов. С учетом довольно значительной мощности отложений авзянской свиты (около 2 км), можно предположить, что изменение кристаллохимических характеристик доломитов в зависимости от их стратиграфического положения в разрезе может быть связано с региональным метаморфизмом погружения осадочных толщ на глубину. Однако это предположение не согласуется с результатами ранее проведенных исследований по доломитам из нижнерифейской саткинской свиты [12, 13] и верхнерифейской миньярской свиты [33]. В типовом разрезе рифея они стратиграфически располагаются соответственно ниже и выше среднерифейской авзянской свиты. Сравнительный анализ показывает, что в миньярских доломитах средние значения параметров  $a$  и  $c$  (соответственно 4.811 Å и 16.022 Å) больше, а в саткинских доломитах (4.808–4.810 Å и 16.006–16.014 Å) – меньше, чем в авзянских доломитах. Процессы метаморфизма погружения обязаны приводить к противоположной зависимости – более

измененные доломиты нижележащих толщ, по сравнению с вышележащими, должны иметь более высокие значения параметров решетки. Следовательно, изменение кристаллохимических характеристик доломитов авзянской свиты, скорее всего, слабо связано с процессом регионального метаморфизма и обусловлено в большей степени другими факторами.

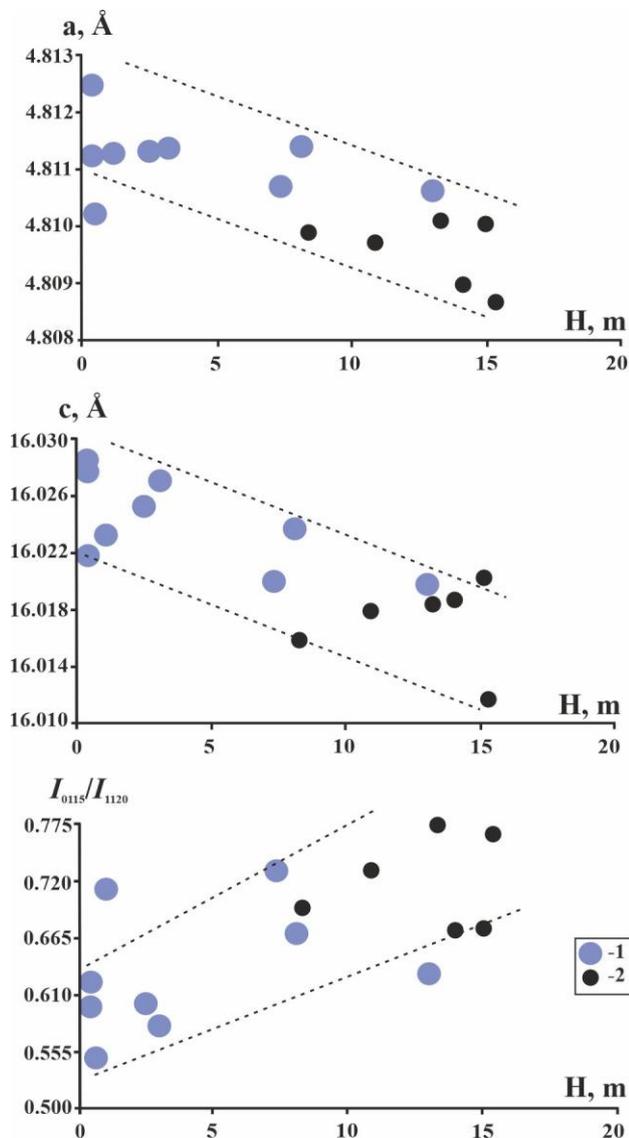
Представляется, что эти факторы носят локальный характер и связаны с деятельностью как постмагматических, так и, вероятно, катагенетических нагретых флюидов, циркуляция которых происходила по зонам разрывных нарушений. Так, в изученных разрезах катаскинской и тюльменской подсвит присутствуют дайки габбродолеритов и во вмещающих их доломитах обнаруживается отчетливая связь изменения кристаллохимических характеристик от расстояния до магматических пород (рис. 5). Наибольшие значения параметров  $a$  и  $c$  кристаллической решетки, а также минимальные величины субструктурного рефлекса  $I_{01.5}/I_{11.0}$  в них фиксируются в непосредственной близости от даек. Согласно петрографическому изучению, в доломитах, расположенных в разрезах вблизи габбродолеритов наблюдаются процессы рекристаллизации, которые не отмечаются на большом расстоянии от них. К тому же, в доломитах около магматических пород, как правило, увеличиваются концентрации Cr и Ni. Все это указывает на то, что перекристаллизация доломитов и изменение в них кристаллохимических параметров в разрезах у с. Веселовка и на р. Тюльмень связаны с деятельностью постмагматических флюидов.

Другой причиной эпигенетической перекристаллизации доломитов и изменения в них кристаллохимических параметров может быть воздействие Fe- и Mn-содержащих катагенетических флюидов и их разгрузкой в тектонически ослабленных зонах. В обнажениях у д. Исламбаево и на р. Б. Авзян не установлены магматические породы, однако, в них, также как и в доломитах из других разрезов авзянской свиты, обнаруживаются гидротермальные кальцит-доломитовые прожилки, образованные при температурах 350–530°C и давлениях 0.3–0.7 кбар (см. табл. 3).

В реветских доломитах на р. Б. Авзян в прожилках отмечается окварцевание. Кварц представлен вытянутыми кристаллами, ориентированными поперек или под углом к направлению прожилков (см. рис. 2 *с, d*), что, вероятно, свидетельствует о сопутствующих их формированию процессах растяжения. В обнажении у д. Исламбаево в доломитах катаскинского уровня наблюдаются метасоматические (?) участки в виде разноориентированных полос с разным уровнем насыщения Fe и Mn, при этом участки с максимальным содержанием железа ( $\text{FeO}=3.09$  мас. %, см. табл. 3) развиваются вдоль границ дизъюнктивных дислокаций (см. рис. 3 *b*).

Перечисленные особенности позволяют предполагать синтетектоническую циркуляцию средне- и высокотемпературных Fe- и Mn-содержащих флюидов в доломитах из разрезов у д. Исламбаево и на р. Б. Авзян. К этому следует добавить, что ранее нами фиксирова-

лись сходные высокие температуры катагенетических флюидов (350–570°C) при аллохимическом метаморфизме и доломитизации известняков суранской свиты нижнего рифея в зоне дислокационного метаморфизма, в которой отсутствовали магматические породы [34].



**Рис. 5.** Зависимость между параметрами кристаллической решетки, коэффициентом упорядочения структуры  $K(I_{015}/I_{110})$  и расположением доломитов относительно даек габбро-долеритов: 1 – катаскинская подсвита (с. Веселовка); 2 – тюльменская подсвита (р. Тюльмень).

[Fig. 5. Relationship between crystal lattice parameters and structure ordering coefficient  $K(I_{015}/I_{110})$  and the location of dolomites relative to gabbrodolerite dikes: (1) – Kataskin sub-formation (Veselovka village); (2) – Tzulmen sub-formation (Tzulmen river).]

### Заключение

В доломитах авзянской свиты фиксируются повышенные параметры кристаллической решетки ( $a_{cp}=4.8105 \text{ \AA}$ ,  $c_{cp}=16.0211 \text{ \AA}$ ) и пониженные значения субструктурного рефлекса ( $K_{cp}=0.66$ ) по сравнению со

стехиометрическими доломитами. Только единичные образцы тюльменской и реветской подсвит по параметру  $a$  ( $4.809 \text{ \AA}$ ) сходны со стехиометрическими доломитами. Средние содержания Fe (II) равны  $4545 \text{ г/т}$ , Mn –  $423 \text{ г/т}$ , Sr –  $124 \text{ г/т}$ .

Доломиты разных стратиграфических уровней авзянской свиты подвержены интенсивным эпигенетическим преобразованиям, обусловленным воздействием на породы Fe- и Mn-содержащих средне- и высокотемпературных флюидов. В доломитах установлена значимая прямая корреляция ( $K_{корр}=0.78$ ) между содержаниями Fe и Mn, а также высокие значения отношения Fe/Sr. В породах всех изученных разрезов обнаружено присутствие двух генераций доломита и кальцита. Образование кальцит-доломитовых прожилков происходило при температурах  $260\text{--}530^\circ\text{C}$  и давлениях  $0.3\text{--}2.3 \text{ кбар}$ . В поздней генерации доломитов по сравнению с ранней увеличиваются концентрации Fe и Mn, а вблизи перекристаллизованных участков часто развиваются гидроокислы железа. Увеличение параметров кристаллической решетки доломитов авзянской свиты прямо коррелирует с ростом содержаний Fe и Mn, а значения субструктурного рефлекса имеют с ними обратную связь.

В доломитах разных подсвит средние значения параметров кристаллической решетки  $a$  и  $c$  уменьшаются от ранне- (катаскинская подсвита) к позднеавзянским (тюльменская подсвита). В этом же направлении увеличиваются средние значения коэффициента  $K$  упорядочения структуры доломитов. Изменение кристаллохимических характеристик доломитов авзянской свиты связано не столько с процессом регионального метаморфизма, сколько с деятельностью постмагматических (разрезы у с. Веселовка и на р. Тюльмень) и катагенетических (разрезы у д. Исламбаево и на р. Б. Авзян) флюидов, циркуляция которых происходила по зонам разрывных нарушений.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ларионов Н. Н. Геология и рудоносность авзянской терригенно-карбонатной формации среднего рифея на Южном Урале: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург, ИГТ УрО РАН, 1994. 19 с.
2. Маслов А. В., Анфимов Л. В. Авзянская рудоносная свита среднего рифея Южного Урала (литостратиграфия, условия образования, минерагения). Екатеринбург: Уро РАН. 2000. 132 с.
3. Bartley J. K., Khan L. C., McWilliams J. L., Stagner A. F. Carbon isotope chemostratigraphy of the Middle Riphean type section (Avzyan Formation, Southern Urals, Russia): Signal recovery in a fold-and-thrust belt // *Chem. Geol.*. 2007. Vol. 273. P. 211–232.
4. Демчук И. Г. Рентгенографическое исследование изоморфизма в доломитах // *Известия Академии наук. Серия геологическая*. 1992. № 10. С. 153–158.
5. Drits V. A., Mccarty D. K., Sakharov B., Milliken K. L. New Insight into Structural and Compositional Variability in Some

- Ancient Excess-Ca Dolomite // *Can. Miner.* 2005. Vol. 43. P. 1255–1290.
6. Reeder R. J., Sheppard C. E. Variation of lattice parameters in some sedimentary dolomites // *American Mineralogist*. 1984. Vol. 69. P. 520–527.
7. Zvir Y., Pimentel C., Pina C. M. The Effect of Stoichiometry, Mg-Ca Distribution, and Iron, Manganese, and Zinc Impurities on the Dolomite Order Degree: A Theoretical Study // *Minerals*. 2021. Vol. 11. 702 p.
8. Демчук И. Г., Кисин А. Ю. Кристаллохимия доломитов метаморфических и осадочных пород // *Ежегодник-1991. Тр. ИГГ УрО РАН*. 1992. Вып. 139. 79 с.
9. Мандрикова Н. Т., Перозин Г. Н. Способ определения генетической группы доломита. Авторское свидетельство SU 1130782 А (G 01 N 23/20). 1984. Бюл. № 47.
10. Шемин Г. Г., Чернова Л. С., Потлова М. М., Ващенко В. А., Дорогиницкая Л. М., Ларичев А. И. Опорный разрез преобразованного продуктивного горизонта вендско-нижнекембрийского карбонатного комплекса (Лено-Тунгусская нефтегазоносная провинция) // *Геология и геофизика*. 2012. Т. 53. № 2. С. 226–236.
11. Ескин А. А. Морфолого-генетические типы структур пустотного пространства карбонатных пород и факторы их формирования (на примере восточного борта Мелекесской впадины и западного склона Южно-Татарского свода): автореф дис. ... канд. геол.-мин. наук. Казань, 2014. 24 с.
12. Крупенин М. Т., Гуляева Т. Я., Галахова О. Л., Маканов С. В., Хиллер В. В., Замятин Д. А. Генетические особенности доломитов Саткинского магнетитового месторождения по данным рентгенографии и микронзондирования // *Ежегодник-2012. Тр. ИГГ УрО РАН*. 2013. Вып. 160. С. 207–212.
13. Крупенин М. Т., Гуляева Т. Я., Щапова Ю. В. Кристаллохимические особенности вмещающих и вторичных доломитов Саткинского магнетитового месторождения по данным рентгеновской дифракции и ЭПР // *Минералы: строение, свойства, методы исследования: материалы V Всероссийской молодежной научной конференции*. Екатеринбург, 2013. С. 98–101.
14. Пучков В. Н., Сергеева Н. Д., Краснобаев А. А. Стратиграфическая схема стратотипа рифея Южного Урала // *Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов АН РБ*. 2017. № 23. С. 3–26.
15. Стратотип рифея: Стратиграфия: Геохронология. Отв. ред. Б. М. Келлер, Н. М. Чумаков. М.: Наука, 1983. 184 с.
16. Стратиграфические схемы Урала (Докембрий, палеозой) / Междвед. Стратиграф. Комитет России. Екатеринбург, 1993. 151 схема. 152 с.
17. Дуб С. А. Верхнерифейско-вендские отложения Башкирского мегантиклинория Южного Урала: состояние изученности и стратиграфическое расчленение // *Геология и геофизика*. 2021. Т. 62. № 11. С. 1511–1530.
18. Маслов А. В. Разрез верхнего докембрия Южного Урала и перерывы в нем // *Ежегодник-2019*. Екатеринбург: Тр. ИГГ УрО РАН. 2020. Вып. 167. С. 38–42.
19. Козлов В. И., Сергеева Н. Д., Новые данные о геологическом строении Северо-Западной части Учалинского района (Южный Урал) // *Геологический вестник*. 2004. № 4. С. 27–38.
20. Гарань М. И. Нижний и средний докембрий. Геология СССР. Т. 12. Пермская, Свердловская, Челябинская и Курганская области. Ч. 1. Геологическое описание. Кн. 1. М.: Недра, 1969. С. 64–149.
21. Маслов А. В., Крупенин М. Т., Гареев Э. З., Анфимов Л. В. Рифей западного склона Южного Урала. Т. 3. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2001. 132 с.
22. Мичурин С. В., Крупенин М. Т., Шиянова Е. О., Савельев Д. Е., Горожанин В. М., Дуб С. А., Казбулатова Г. М., Шарипова А. А., Ахмедова Р. Р. Разрез тюльменской подсвиты авзянской свиты среднего рифея (хр. Белягуш, Южный Урал): геология, стратиграфия, магматические образования // *Геологический вестник*. 2022. № 3. С. 16–33.
23. Таланцев А. С. Геотермометрия по доломит-кальциевым парагенезисам. М.: Наука, 1981. 135 с.
24. Cathelineau M. Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature // *Clay Minerals*. 1988. Vol. 23. No 4. P. 471–485.
25. Jowett E.C. Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer. GAC/MAC/SEG Joint Annual Meeting. Toronto. May 27–29. 1991. Program with Abstracts 16. A62.
26. Карбонаты, минералогия и химия: пер. с англ. под ред. Р. Дж. Ридера. М.: Мир, 1987. 496 с.
27. Кузнецов А. Б., Семихатов М. А., Маслов А. В., Горохов И. М., Прасолов Э. М., Крупенин М. Т., Кислова И. В. Sr- и C-изотопная хемотратиграфия типового разреза верхнего рифея (Южный Урал): новые данные. // *Стратиграфия. Геол. Корреляция*. 2006. Т. 14. № 6. С. 25–53.
28. Banner J. L., Hanson G. N. Calculation of simultaneous isotopic and trace element variations during water-rock interaction with application to carbonate diagenesis // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1990. Vol. 54. P. 3123–3137.
29. Swart P. K. The geochemistry of carbonate diagenesis: the past, present and future // *Sedimentology*. 2015. Vol. 62. I. 5. P. 1233–1304.
30. Cai W. K., Liu J. H., Zhou C. H., Kelling J., Glasmacher U. A. Structure, genesis and resources efficiency of dolomite: New insights and remaining enigmas // *Chem. Geol.* 2021. Vol. 573. P. 120–191.
31. Machel H. G. Concepts and models of dolomitization: a critical reappraisal / The Geometry and Petrogenesis of Dolomite Hydrocarbon Reservoirs. Geological Society, London, Special Publications. Vol. 235. 2004. P. 7–63.
32. McKenzie J. A., Vasconcelos C. Dolomite Mountains and the origin of the dolomite rock of which they mainly consist: historical developments and new perspectives // *Sedimentology*. 2009. Vol. 56. P. 205–219.
33. Ахмедова Р. Р., Мичурин С. В., Карамова А. М., Казбулатова Г. М. Кристаллохимические особенности доломитов нижней подсвиты миньярской свиты верхнего рифея (д. Толпарово, Южный Урал) // *Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий*. 2022. № 10. С. 132–135.
34. Мичурин С. В., Султанова А. Г., Казбулатова Г. М., Шарипова А. А., Савельев Д. Е., Горожанин В. М., Карамова А. М., Войкина З. А. Фтор и хлор в карбонатных породах лапыштинской подсвиты суранской свиты нижнего рифея (Багарыштинский разрез, Южный Урал) // *Геологический вестник*. 2020. № 3. С. 3–26.

## Crystal-chemical, mineralogical and geochemical features of dolomites of the Avzyan formation of the Middle Riphean (Southern Urals)

©2023 R. R. Akhmedova<sup>1✉</sup>, S. V. Michurin<sup>1</sup>, E. O. Shiyanova<sup>2</sup>, N. D. Sergeeva<sup>1</sup>, A. A. Sharipova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geology, Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,  
16/2 Karla Marksa ul., 450077, Ufa, Russian Federation*

<sup>2</sup>*OOO RN-BashNIPIneft, 30/1 Karla Marksa ul., 450008, Ufa, Russian Federation*

### Abstract

*Introduction:* The crystallochemical characteristics and the reasons for their variations in the dolomites of the Avzyan Formation of the Middle Riphean of the Bashkir meganticlinorium, weakly and strongly modified by epigenetic processes, have been determined.

*Methods:* X-ray diffraction, X-ray fluorescence analysis, electron microscopy with energy-dispersive microanalysis.

*Results and discussions:* In the dolomites of the Avzyan formation, increased parameters of the crystal lattice are recorded ( $a_{av}=4.8105 \text{ \AA}$ ,  $c_{av}=16.0211 \text{ \AA}$ ) and decreased values of the substructural reflection ( $K_{av}=0.66$ ) compared to stoichiometric dolomites. The average Fe (II) content is 4545 g/t, Mn – 423 g/t, Sr – 124 g/t. An increase in the crystal lattice parameters of dolomites of the Avzyan formation directly correlates with an increase in the contents of Fe and Mn, and the values of the substructural reflection have an inverse relationship with them. The presence of two generations of dolomite and calcite was discovered in the rocks of all studied sections. The formation of calcite-dolomite vein occurred at temperatures of 260–530°C and pressures of 0.3–2.3 kbar. In dolomites of different subformations, the average values of the crystal lattice parameters  $a$  and  $c$  decrease from early (Kataska subformation) to late Avzyan (Tulmenskaya subformation). The same trend of increase was revealed for average values of the coefficient  $K$  of ordering the structure of dolomites.

*Conclusions:* Dolomites of different stratigraphic levels of the Avzyan formation are subject to intense epigenetic transformations caused by the impact of Fe- and Mn-containing medium- and high-temperature fluids on the rocks. The change in the crystallochemical characteristics of the dolomites of the Avzyan formation is associated not so much with the process of regional metamorphism, but with the activity of post-magmatic (sections near the village of Veselovka and on the Tulmen River) and catagenetic (sections near the village of Islambaevo and B. Avzyan River) fluids, the circulation of which occurred in faults.

**Keywords:** dolomites, Avzyan formation, crystal-chemical characteristics, Bashkir meganticlinorium, Southern Urals.

*Funding:* The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Geology UFRS RAS No. FMRS-2022-0015 and No. FMRS-2022-0013.

*For citation:* Ahmedova R. R., Michurin S. V., Shiyanova E. O., Sergeeva N. D., Sharipova A. A. Crystal-chemical, mineralogical and geochemical features of dolomites of the Avzyanskaya suite of the Middle Riphean (Southern Urals) // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 3, pp. 40–56 DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/3/40-56>



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Akhmedova Regina Ravil kizi, e-mail: [delmukhametovar@mail.ru](mailto:delmukhametovar@mail.ru)

*Conflict of interests:* The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

## REFERENCES

- Larionov N. N. *Geologiya i rudonosnost' avzyanskoj terrigenno-karbonatnoi formatsii srednego rifeya na Yuzhnom Urale*. Diss. kand. geol.-min. nauk [Geology and ore content of the avzyan terrigenous-carbonate formation of the middle Riphean in the Southern Ural. Diss. PhD. geol. min. Sciencer]. Ekaterinburg, IGG Uro RAN, 1994. 19 p. (In Russ.)
- Maslov A. V., Anfimov L. V. *Avzyanskaya rudonosnaya svita srednego rifeya Yuzhnogo Urala (litostratigrafiya, usloviya obrazovaniya, minerageniya)* [The Avzyansk ore-bearing formation of the Middle Riphean of the Southern Urals (lithostratigraphy, conditions of formation, minerageny)]. Ekaterinburg, Uro RAN publ., 2000, 132 p. (In Russ.)
- Bartley J. K., Khan L. C., McWilliams J. L., Stagner A. F. Carbon isotope chemostratigraphy of the Middle Riphean type section (Avzyan Formation, Southern Urals, Russia): Signal recovery in a fold-and-thrust belt. *Chemical Geology*, 2007, vol. 273, pp. 211–232.
- Demchuk I. G. Rentgenograficheskoe issledovanie izomorfizma v dolomitakh [Radiografic study of isomorphism in dolomites]. *Izvestiya akademii nauk. Seriya geologicheskaya – Academy of Sciences. Geological series*, 1992, no. 10, pp. 153–158. (In Russ.)
- Drits V. A., Mccarty D. K., Sakharov B., Milliken K. L. New Insight into Structural and Compositional Variability in Some Ancient Excess-Ca Dolomite. *The Canadian Mineralogist*, 2005, vol. 43, pp. 1255–1290.
- Reeder R. J., Sheppard C. E. Variation of lattice parameters in some sedimentary dolomites. *American Mineralogist*, 1984, vol. 69, pp. 520–527.
- Zvir Y., Pimentel C., Pina C. M. The Effect of Stoichiometry, Mg-Ca Distribution, and Iron, Manganese, and Zinc Impurities on the Dolomite Order Degree: A Theoretical Study. *Minerals*, 2021, vol. 11, pp. 702.
- Demchuk I. G., Kisin A. U. Kristallokhimiya dolomitov metamorficheskikh i osadochnykh porod [Crystal chemistry of metamorphic and sedimentary dolomites]. *Ezhegodnik-1991, Tr. IGG UrO RAN – Yearbook-1991. Tr. IGG UrO RAN*, Vol. 139, 1992, 79 p. (In Russ.)
- Mandrikova N. T., Perosio G. N. Sposob opredeleniya geneticheskoi gruppy dolomita [Method for determining the genetic group of dolomite]. Copyright certificate SU 1130782 A (G 01 N 23/20), 1984, publ., no. 47. (In Russ.)
- Shemin G. G., Chernova L. S., Potlova M. M., Vashchenko V. A., Doroginskaya L. M., Larichev A. I. Oporny razrez preobrazhenskogo produktivnogo gorizonta vendsko-nizhnembriiskogo karbonatnogo kompleksa (Leno-Tungusskaya neftegazonosnaya provintsiya) [Reference section of the Preobrazhensky productive horizon of the Vendian-Lower Cambrian carbonate complex (Leno-Tunguska oil and gas province)]. *Geologiya i geofizika – Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, no. 2, pp. 226–236 (In Russ.)
- Eskin A. A. *Morfologo-geneticheskie tipy struktur pustotnogo prostranstva karbonatnykh porod i faktory ih formirovaniya (na primere vostochnogo borta Melekesskoi vpadiny i zapadnogo sklona Yuzhno-Tatarskogo svoda)*. Diss. kand. geol.-min. nauk [Morphological and genetic types of structures of the void space of their formation (on the example of the eastern side of the Melekes depression and the western slope of the South Tatar arch. Diss. PhD. geol. min. Sciencer]. Kazan, 2014. 24 p. (In Russ.)
- Krupenin M. T., Gulyaeva T. Y., Galakhova O. L., Makanov S. V., Khiller V. V., Zamyatin D. A. Geneticheskie osobennosti dolomitov Satkinskogo magnezitovogo mestorozhdeniya po dannym rentgenografii i mikrozonirovaniya [Genetic features of dolomites of the Satka magnesite deposit according to X-ray and microprobe data]. *Ezhegodnik-2012, Tr. IGG UrO RAN – Yearbook-2012. Tr. IGG UrO RAS*, 2013, Vol. 160, pp. 207–212 (In Russ.)
- Krupenin M. T., Gulyaeva T. Y., Shchapova Y. V. Kristallokhimicheskie osobennosti vmeshchayushchikh i vtorichnykh dolomitov Satkinskikh magnezitovykh mestorozhdenii po dannym rentgenovskoi difrakcii i EPR [Crystal chemical features of the host and secondary dolomites of the Satka magnesite deposits according to X-ray diffraction and EPR data]. *Mineraly: stroenie, svoystva, metody issledovaniya: materialy V Vserossiyskoy molodozhnoi nauchnoi konferentsii*. [Minerals: structure, properties, research methods: materials of the meeting]. Ekaterinburg, October 14–17, 2013, 2013, pp. 98–101 (In Russ.)
- Puchkov V. N., Sergeeva N. D., Krasnobaev A. A. Stratigraficheskaya skhema stratotipa rifeya Yuzhnogo Urala [Stratigraphic scheme of the Riphean stratotype of the Southern Urals]. *Geologiya. Izvestiya Otdeleniya nauk o Zemle i prirodnnykh resursov AN RB – Geology. Proceedings of the Department of Earth Sciences and Natural Resources of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*, 2017, no. 23, pp. 3–26. (In Russ.)
- Stratotip rifeya: Stratigrafiya: Geokhronologiya. [The stratotype of the Riphean: Stratigraphy: Geochronology]. Ed. by B. M. Keller, N. M. Chumakov. Moscow, Nauka publ., 1983. 184 p. (In Russ.)
- Stratigraficheskie skhemy Urala (Dokembrii, paleozoi). [Stratigraphic schemes of the Urals (Precambrian, Paleozoic)]. Medved. Stratigraph. The Committee of Russia. Ekaterinburg, MSK publ., 1993, 151 schemes., 152 p. (In Russ.)
- Dub S. A. Verhnerifeisko-vendskie otlozheniya Bashkirskogo megantiklinoriya Yuzhnogo Urala: sostoyanie izuchennosti i stratigraficheskoe raschlenenie [Upper Riphean-Vendian deposits of the Bashkir meganticlinorium of the Southern Urals: state of knowledge and stratigraphic subdivision]. *Geologiya i geofizika – Geology and Geophysics*, 2021, vol. 62, no. 11, pp. 1511–1530 (In Russ.)
- Maslov A. V. Razrez verkhnego dokembriya Yuzhnogo Urala i pereryv v nem [Section of the Upper Precambrian of the Southern Urals and breaks in it]. *Ezhegodnik-2019, Ekaterinburg: Tr. IGG UrO RAN – Yearbook-2019. Yekaterinburg: Tr. IGG UrO RAS*, 2020, Vol. 167, pp. 38–42 (In Russ.)
- Kozlov V. I., Sergeeva N. D., Novye dannye o geologicheskoy stroenii Severo-Zapadnoi chasti Uchalinskogo raiona (Yuzhnyi Ural) [New data on the geological structure of the North-Western part of Uchalinsky district (Southern Urals)]. *Geologicheskii vestnik – Geological vestnik*, 2004, no. 4, pp. 27–38. (In Russ.)
- Garan M. I. *Nizhnii i srednii dokembrii. Geologiya SSSR*. [Lower and Middle Precambrian. Geology of the USSR]. Perm, Sverdlovsk, Chelyabinsk and Kurgan regions. Part 1. Geological description. Book 1, Moscow, Nedra publ., 1969, vol. 12, I. 1, pp. 64–149 (In Russ.)
- Maslov A. V., Krupenin M. T., Gareev E. Z., Anfimov L. V. *Rifei zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala* [Rifei of the western slope of the Southern Urals]. T. 3. Ekaterinburg: Izd. IGG UrO RAN publ., 2001, 132 p. (In Russ.)
- Michurin S. V., Krupenin M. T., Shiyanova E. O., Savelyev D. E., Gorozhanin V. M., Duba S. A., Kazbulatova G. M., Sharipova A. A., Akhmedova R. R. Razrez tyul'menskoi podsvity avzyanskoj svity srednego rifeya (hr. Belyagush, YUzhnyj Ural): geologiya, stratigrafiya, magmaticheskie obrazovaniya [Section

- of the Tyulmen sub-formation of the Avzyan formation of the Middle Riphean (Belyagush, Southern Urals): geology, stratigraphy, magmatic formations]. *Geologicheskii vestnik – Geological vestnik*, 2022, no. 3, pp. 16–33 (In Russ.)
23. Talantsev A. S. *Geotermobarometriya po dolomit-kal'tsi-tovym paragenezisam*. [Geothermobarometry by dolomite-calcite paragenesis]. Moscow, Nauka publ., 1981, 135 p. (In Russ.)
24. Cathelineau M. Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature. *Clay Minerals*, 1988, vol. 23, no. 4, pp. 471–485.
25. Jowett E.C. Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer. *GAC/MAC/SEG Joint Annual Meeting*. Toronto. May 27–29. 1991. Program with Abstracts 16. A62.
26. *Karbonaty, mineralogiya i khimiya* [Carbonates, mineralogy and chemistry]: translated from English. Ed. R. J. Reader. Moscow, Mir publ., 1987, 496 p. (In Russ.)
27. Kuznetsov A. B., Semikhatov M. A., Maslov A. V., Gorokhov I. M., Prasolov E. M., Krupenin M. T., Kislova I. V. Sr- i S-izotopnaya khemostratigrafiya tipovogo razreza verkhnego rifeya (Yuzhnyi Ural): novye dannye [Sr- and C-isotope chemostratigraphy of a typical section of the Upper Riphean (Southern Urals): new data]. *Stratigrafiya. Geol. Korrelyatsiya – Stratigraphy. Geol. Correlation*, 2006, vol. 14, no. 6, pp. 25–53 (In Russ.)
28. Banner J. L., Hanson G. N. Calculation of simultaneous isotopic and trace element variations during water-rock interaction with application to carbonate diagenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, vol. 54, pp. 3123–3137.
29. Swart P. K. The geochemistry of carbonate diagenesis: the past, present and future. *Sedimentology*, 2015, vol. 62, I. 5, pp. 1233–1304.
30. Cai, W. K., Liu, J. H., Zhou, C. H., Kelling, J. and Glasmacher, U. A. Structure, genesis and resources efficiency of dolomite: New insights and remaining enigmas. *Chemical Geology*, 2021, vol. 573, pp. 120–191.
31. Machel H. G. Concepts and models of dolomitization: a critical reappraisal. From: Braithwaite C. J., Rizzi G., Darke G. (Ed.). *The Geometry and Petrogenesis of Dolomite Hydrocarbon Reservoirs. Geological Society, London, Special Publications 235*, 2004, pp. 7–63.
32. McKenzie, J. A., Vasconcelos, C. Dolomite Mountains and the origin of the dolomite rock of which they mainly consist: historical developments and new perspectives. *Sedimentology*, 2009, vol.56, pp.205–219.
33. Akhmedova R. R., Michurin S. V., Karimova A. M., Kazbulatova G. M. Kristallokhimicheskie osobennosti dolomitov nizhnei podsvity min'yarskoj svity verkhnego rifeya (d. Tolparovo, Yuzhnyi Ural) [Crystallochemical features of dolomites of the lower sub-formation of the Minyar formation of the Upper Riphean (Tolparovo village, Southern Urals)]. *Geologiya, geookologiya i resursnyi potencial Urala i sopredel'nykh territorii – Geology, geoecology and resource potential of the Urals and adjacent territories*, 2022, no. 10, pp. 132–135 (In Russ.)
34. Michurin S. V., Sultanova A. G., Kazbulatova G. M., Sharipova A. A., Savelyev D. E., Gorozhanin V. M., Karamova A. M., Voikina Z. A. Ftor i khlor v karbonatnykh porodakh lapyshtinskoj podsvity suranskoj svity nizhnego rifeya (Bagaryshtinskij razrez, YUzhnyj Ural) [Fluorine and chlorine in carbonate rocks of the Lapyshta sub-formation of the Suran formation of the Lower Riphean (Bagaryshta section, Southern Urals)]. *Geologicheskii vestnik – Geological vestnik*, 2020, no. 3, pp. 3–26 (In Russ.)

*Ахмедова Регина Равил кизи*, мл.н.с., Институт геологии обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), Уфа, РФ; e-mail: delmukhametovar@mail.ru; ORCID 0009-0009-4408-6524

*Мичурин Сергей Васильевич*, к.г.-м.н., в.н.с., Институт геологии обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), Уфа, РФ; e-mail: s\_michurin@mail.ru; ORCID 0000-0002-2776-2190

*Шишанова Евгения Олеговна*, гл. специалист, Общество с ограниченной ответственностью РН-БашНИПИнефть, Уфа, РФ; e-mail: pindyurinaevgeniya@mail.ru; ORCID 0009-0002-8686-1209

*Сергеева Нина Дмитриевна*, к.г.-м.н., в.н.с., Институт геологии обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), Уфа, РФ; e-mail: riphey@ufaras.ru; ORCID 0000-0002-5202-1853

*Шарипова Айсылу Азатовна*, к.г.-м.н., н.с., Институт геологии обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), Уфа, РФ; e-mail: aysyluazatovna@mail.ru; ORCID 0000-0001-5339-9316

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Regina R. Akhmedova*, Junior Researcher, Institute of Geology Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa, Russian Federation; e-mail: delmukhametovar@mail.ru; ORCID 0009-0009-4408-6524

*Sergey V. Michurin*, PhD in Geol-Min., Senior Researcher, Institute of Geology Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa, Russian Federation; e-mail: s\_michurin@mail.ru; ORCID 0000-0002-2776-2190

*Evgeniya O. Shiyanova*, Main Expert, Limited Liability Company RN-BashNIPIneft, Ufa, Russian Federation; e-mail: pindyurinaevgeniya@mail.ru; ORCID 0009-0002-8686-1209

*Nina D. Sergeeva*, PhD in Geol-Min., Leading Researcher, Institute of Geology Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa, Russian Federation; e-mail: riphey@ufaras.ru; ORCID 0000-0002-5202-1853

*Aisylu A. Sharipova*, PhD in Geol-Min., Researcher, Institute of Geology Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa, Russian Federation; e-mail: aysyluazatovna@mail.ru; ORCID 0000-0001-5339-9316

*Authors have read and approved the final manuscript.*