

УДК 552+550.4

DOI: 10.24930/1681-9004-2023-23-5-844-867

## Комплексная характеристика зювитов р. Б. Вануйта (Карская астроблема, Россия)

Н. И. Максименко, Т. Г. Шумилова, В. В. Уляшев

Институт геологии им. академика Н.П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 167000, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 54,  
e-mail: nadiamaximenko@mail.ru

Поступила в редакцию 01.04.2022 г., принята к печати 20.02.2023 г.

*Объектом исследований* являются зювиты восточного сектора Карской астроблемы, расположенные в бассейне р. Большая Вануйта. *Цель исследования.* Определение типовой принадлежности и установление фациальных особенностей зювитов на р. Б. Вануйта. *Материал для исследований* представлен штучными образцами зювитов, отобранными в бассейнах рек Б. Вануйта, Анарога, Кара и Сопчаю, а также образцами алевролитов, отобранными за пределами Карского кратера (рр. Халмерью, Саяха, Путью, Анарога и руч. Лавовый). Пробы использованы для изготовления полированных шлифов и порошковых препаратов для химического и других видов анализа. *Методы исследования* включают в себя полевое изучение, оптическую и электронную сканирующую микроскопию и силикатный анализ методом “мокрой химии”. *Результаты и выводы.* Впервые детально охарактеризованы структурно-текстурные и петрохимические особенности зювитов р. Б. Вануйта. Выявлено, что матрикс зювитов имеет интенсивно спекшийся характер и состоит из полевых шпатов, кварца, кальцита, хлорита, мусковита, глауконита, титанита. Литокласты включают в себя алевролиты, песчаники, известняки, аргиллиты и сланцы. Витрокласты отличаются угловатой и неправильной морфологией с различным характером границ, пятнистыми, флюидальными и пористыми текстурами. Выявленное сходство вещественного состава кластов алевролитов и аналогичных исходных пород подтверждает генетическую взаимосвязь и ведущую роль этого типа пород мишени в образовании изученных зювитов. Установлено, что зювиты р. Б. Вануйта являются породами аэродинамической фации, сформированными в относительно высокотемпературных условиях, в структурном плане залегают в нижней части разреза толщи обломочных импактитов аэродинамической фации.

**Ключевые слова:** зювит, импактит, ударный метаморфизм, импактитогенез, Карская астроблема

### Источник финансирования

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90011. Аналитические работы выполнены в ЦКП “Геонаука” (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар) при частичном финансировании НИР ГР № 122040600009-2

## Complex characteristics of suevites at the B. Vanuyta river (Kara astrobleme, Russia)

Nadezhda I. Maksimenko, Tatyana G. Shumilova, Vasily V. Ulyashev

N.P. Yushkin Institute of Geology, FRC Komi SC UB RAS, 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar 167000, Russia,  
e-mail: nadiamaximenko@mail.ru

Received 01.04.2022, accepted 20.02.2023

*Research subject.* Suevites from the eastern sector of the Kara astrobleme, located in the basin of the Bolshaya Vanuyta river. *Aim.* To identify the suevitic type and to clarify the facial features of the suevites from the B. Vanuyta River. *Materials.* Hand-size samples of suevites collected in the basins of B. Vanuyta, Anaroga, Kara, and Sopchayu rivers, as well as samples of siltstones collected outside the Kara crater (rivers Halmeryu, Sayakha, Putyu, Anaroga and the creek Lavovyi). The samples were used for preparing polished thin sections and powder specimens for analytical works. *Methods.* Field observations, optical and electron scanning microscopy, and silicate analysis by the wet chemical method. *Results and conclusions.* The structural-textural and petrochemical features of the matrix, fragments of impact glasses, and lithoclasts of suevites from the B. Vanuyta river were characterized. The suevite matrix was found to exhibit an in-

**Для цитирования:** Максименко Н.И., Шумилова Т.Г., Уляшев В.В. (2023) Комплексная характеристика зювитов р. Б. Вануйта (Карская астроблема, Россия). *Литосфера*, 23(5), 844-867. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-5-844-867>

**For citation:** Maksimenko N.I., Shumilova T.G., Ulyashev V.V. (2023) Complex characteristics of suevites at the B. Vanuyta river (Kara astrobleme, Russia). *Lithosphere (Russia)*, 23(5), 844-867. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-5-844-867>

© Н.И. Максименко, Т.Г. Шумилова, В.В. Уляшев, 2023

tensely sintered character and to be presented by feldspar, quartz, calcite, chlorite, muscovite, glauconite, and titanite. Lithoclasts include siltstones, sandstones, limestones, mudstones, and shales. Vitroclasts are characterized by angular and irregular morphology with different border patterns, and spotted, fluid, and porous textures. The similarity of the chemical composition of siltstone clusters and similar target rocks confirms the genetic relationship and the leading role of this type of target rocks in the formation of the studied suevites. The proximity in the composition of the impact glasses of the studied suevites and the glasses of type I and II suevites indicates the formation of suevite vitroclasts in the river B. Vanuyta by a similar protolith – siltstones and a clay component of the limestones. The matrix lithification character, morphology and nature of the vitroclast outlines indicate that the suevites from the B. Vanuyta river are the rocks of an aerodynamic facies formed under relatively high-temperature conditions, which structurally lie at the lower part of the detrital impactites sequence of the aerodynamic facies. The studied rocks are close to the type I suevites by the composition of the protolith and differ in the conditions of their formation. With the type II suevites, they have similar facies characteristics, but differ in the composition of the target rocks fragments. It is determined that the leading factor in the typification of suevites from the Kara astrobleme is the chemical composition, at the same time, the types can be subdivided more fractionally based on the specifics of the facies environments of their formation.

**Keywords:** *suevite, impactite, impactite genesis, impact metamorphism, Kara astrobleme*

#### **Funding information**

The reported study was funded by RFBR according to the research project No. 20-35-90011. Analytical studies were carried out at the Center for Collective Use "Geoscience" (Institute of geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar) partially funded through NIR No. 122040600009-2

#### **Acknowledgements**

The authors are grateful to N.S. Kovalchuk for providing thin sections and analytical material on the target rocks of the Kara astrobleme, O.V. Koksharova and E.M. Trofimenko for analytical work. The authors especially appreciate the contribution of referees for their attention and comments.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на Земле насчитывается около 200 достоверно установленных импактных кратеров (Kenkmann, 2021; Gottwald et al., 2020; Schmieder, Kring, 2020). Импактиты представляют собой горные породы метеоритных кратеров. Сегодня импактные породы исследуются весьма активно (Kenkmann et al., 2014; Osinski et al., 2008; Reimold, Koeberl, 2014; Stöffler, Grieve, 2007; Stöffler et al., 2018; и мн. др.). Многие крупные метеоритные кратеры содержат полезные ископаемые (Grieve, 2005; 2013; Grieve, Masaitis, 1994), в связи с чем исследование импактитов гигантских астроблем и импактитогенеза в целом является актуальным.

Зювиты представляют собой полимиктовые импактные брекчии, состоящие из фрагментов импактного стекла, обломков пород и минералов, и тонкодисперсной матрицы (Геологический словарь, 2010; Stöffler, Grieve, 2007). Зювиты подразделяются на фации – породы донной фации, сформированные при движении центробежных потоков, и отложения аэродинамической фации, образованные при выбросе и перемещении материала по бал-

листическим траекториям (Фельдман, 1990). Относительно подробное описание фаций импактитов представлено в исследованиях В.И. Фельдмана (1990), С.А. Вишневого (1992, 2013) и В.Л. Масайтиса (Masaitis et al., 2018) по импактитам Попигайской астроблемы. Вопросы классификации зювитов по условиям формирования затрагивались в работах (King et al., 1999; Stöffler et al., 2013). Донная фация зювитов описана в работе Л.В. Сазоновой (1984) для астроблемы Янисъярви.

Зювиты кратера Рис изучались наиболее детально, в свое время подразделялись по температурным условиям образования и положению в коптогенном комплексе (Stöffler et al., 2013). Рассматривались разные точки зрения на механизмы формирования этих пород, в том числе образование из материала султана выбросов и движущихся "пирокластических потоков" (Meyer, 2012; Osinski et al., 2004). Тем не менее относительно происхождения зювитов на сегодняшний день нет единого мнения. Фациальные особенности этих пород в целом и сегодня остаются недостаточно изученными, не до конца ясно их положение в разрезе коптогенного комплекса астроблем.

Активное изучение импактитов Карской структуры проводилось с начала 70-х гг. XX в. Проведены производственные изыскания с поисковым бурением, выполнены геолого-минералогические и структурно-текстурные исследования карских импактных пород (Масайтис и др., 1980; Фельдман и др., 1981; Селивановская и др., 1990; Фельдман, 1990; и др.). Зювиты Карской астроблемы подразделялись по размеру обломков и составу составных компонентов (Масайтис и др., 1980; Селивановская и др., 1990), содержанию импактного стекла и положению в разрезе (Назаров и др., 1993). Исследователями отмечалось, что зювиты в разных участках Карской астроблемы имеют существенные различия (Селивановская и др., 1990). Указывалось, что состав зювитов часто связан с составом пород мишени, развитых в областях распространения зювитов (Масайтис и др., 1980; Машак и др., 1983; Селивановская и др., 1990). Тем не менее до настоящего времени карские зювиты описывались лишь при общей характеристике обломочных импактитов Карского кратера (Масайтис и др., 1980; Машак и др., 1983; Селивановская и др., 1990). Детального описания зювитов из конкретных участков импактной структуры не было представлено, не проводилось и сопоставления состава отдельных литокластов в зювитах и породах мишени. До сих пор фациальные особенности зювитов Карской астроблемы не были детально охарактеризованы.

С 2015 г. нами проводится системное изучение импактитов Карской астроблемы (Шумилова и др., 2016; 2019; Shumilova et al., 2019; Максименко и др., 2020; Zubov et al., 2021). В южной части импактной структуры по комплексу признаков было выделено три типа зювитов, расположенных соответственно на рр. Анарога (I), Кара (II) и Сопчаю (III) (рис. 1). Предполагалось, что образование каждого типа могло быть связано с разным преобладающим типом протопород зювитов: I типа – преимущественно с алевролитами и песчаниками, II типа – с карбонатными породами, III типа – с углистыми отложениями (Шумилова и др., 2016). В результате углубленного и многоуровневого изучения разновидностей зювитов нами подтверждено принципиальное различие исследованных пород по вещественному составу, связанное с различием их протолита (Максименко и др., 2020). Дальнейшие исследования показали, что помимо состава три типа зювитов могут отличаться также фациальными обстановками образования (Максименко, Шумилова, 2022). В связи с этим на сегодняшний день представляет интерес изучение зювитов других секторов импактной структуры для определения их типовой и фациальной принадлежности, что важно для выяснения характера распространения типов зювитов в пределах астроблемы и уточнения строения коп-

тогенного комплекса Карской астроблемы в целом. Цель данной работы заключается в выявлении типовой принадлежности и установлении фациальных особенностей зювитов восточного борта Карской астроблемы, расположенных в бассейне р. Б. Вануйта. В статье представлены результаты всестороннего изучения зювитов р. Б. Вануйта, их сравнительного анализа с тремя выделенными ранее типами зювитов Карского кратера и с неизменными осадочными породами мишени.

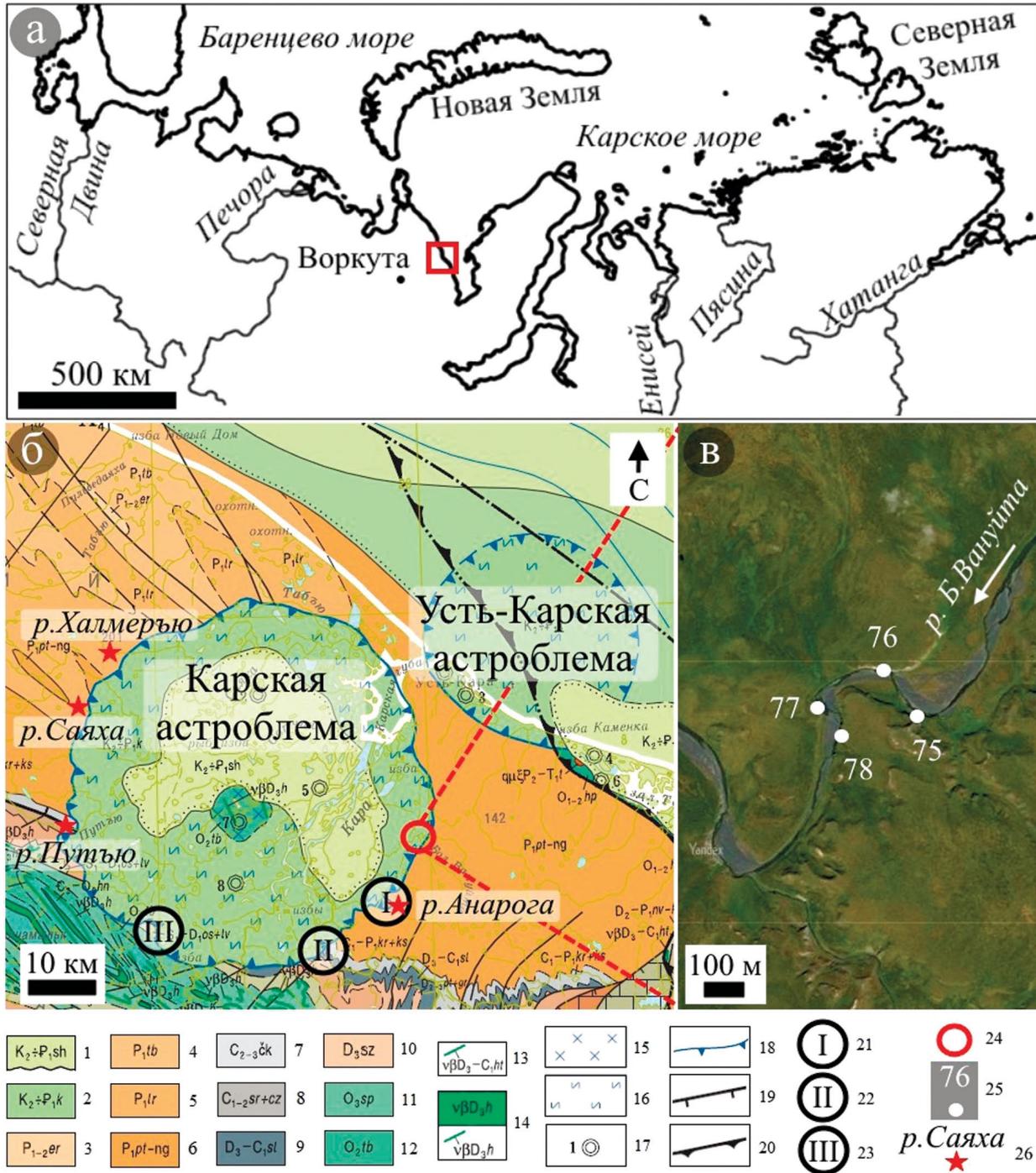
#### КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Карская астроблема располагается в западной части арктической зоны России, в 200 км к северу от г. Воркуты (см. рис. 1). Она имеет диаметр  $\approx 65$  км и является вторым по величине кратером на территории России, входит в десятку крупнейших кратеров мира. Возраст астроблемы по разным данным оценивается в интервале от 60 до 81 млн лет (Koeberl et al., 1990; Nazarov et al., 1989), согласно последним датировкам Ar-Ar методом составляет  $70.3 \pm 2.2$  млн. лет (Trieloff et al., 1998).

Кратер в структурном плане находится в Карском синклинории (Карской впадине), который имеет размеры  $65 \times 180$  км (Юдин, 1994). Границы Карской впадины тектонические, на северо-востоке она ограничена Байдарацкой сутурой, на севере – Предуральским краевым прогибом, с юга и запада – Северопайхойским надвигом, с востока – Карским надвигом (Юдин, 1994). Дно астроблемы представляет собой плоскую, местами всхолмленную эрозионно-аккумулятивную равнину. В рельефе истинного дна выделяется центральное поднятие размером в плане  $8 \times 10$  км, возвышающееся над поверхностью дна более чем на 2 км. Поднятие окружено кольцевым желобом, имеющим широкое плоское днище, осевой диаметр 22–26 км и глубину по отношению к современному рельефу 0.6–2 км (Машак, 1990б).

Мишень Карской астроблемы имеет смешанный характер и представлена двумя структурными этажами: нижним – верхнепротерозойскими, и верхним – палеозойским (Машак, 1990а). Породы верхнего протерозоя имеют мощность более 6 км, выходят лишь в ядре Пай-Хойского антиклинория, в пределах Карской астроблемы вскрыты скважинами на глубине  $\approx 500$  м в области центрального поднятия. Они представлены слюдисто-глинистыми, кремнистыми и актинолитовыми филлитовидными сланцами.

Палеозойские образования имеют мощность более 5 км и включают в себя два структурных яруса. Нижний ярус объединяет различные сланцы, песчаники, известняки и другие отложения ордовика–карбона. Верхний ярус включает в себя песчаники,



**Рис. 1.** Расположение изученных обнажений. а – географическое положение (квадратом выделен район исследований); б – геологическое строение района Карской астроблемы (фрагмент Государственной геологической карты Российской Федерации, по (Шишкин и др., 2012)); в – расположение изученных обнажений зювитов на р. Б. Вануйта (спутниковая карта Yandex, ориентировка аналогична фрагменту “б”)

1–12 – осадочные отложения (1 – сааяхинская толща: глины, алевролиты, переотложенные коптокластиты; 2 – карский коптогенный комплекс: аллогенные брекчии, тагамиты, зювиты, коптокластиты; 3 – ерзягинская свита: песчаники, алевролиты, аргиллиты, угли; 4 – табыюская свита: песчаники, алевролиты, аргиллиты, угли; 5 – лиурьягинская свита: песчаники и алевролиты с песчано-кальцитовыми конкрециями; 6 – пэтаркинская свита и нгебетаяхинская толща: аргиллиты с прослоями кремнистых мергелей, известковистых песчаников и алевролитов; 7 – чайкинская толща: известняки мшанково-брахиоподовые, детритовые; 8 – сартъюская и цементнозаводская свиты: известняки органогенно-детритовые, доломиты; 9 – силоваяхинская свита: фтаниты, черные сланцы, силициты, углеродисто-кремнистые известняки; 10 – сезымюнкошорская толща: известняки, прослой доломитов; 11 – сопчинская свита: известняки и сланцы

глинисто-кремнистые; 12 – тальбейтивисская свита: песчаники, алевролиты, известняки, кремнисто-глинистые сланцы; 13, 14 – интрузивные образования (13 – хойтальбейский комплекс габбродолеритов и долеритов; 14 – хенгурский комплекс габбродолеритов, пикродолеритов и долеритов); 15, 16 – импактные породы (15 – автохтонные породы, копточаклазиты; 16 – аллохтонные породы, зювиты, глыбовые брекчии); 17 – буровые скважины; 18 – границы астроблем; 19, 20 – разрывные нарушения (19 – надвиги, 20 – шарьяжи); 21–24 – области распространения зювитов (21 – зювиты I типа, 22 – зювиты II типа, 23 – зювиты III типа, 24 – зювиты р. Б. Вануйта); 25 – точки наблюдения зювитов на р. Б. Вануйта; 26 – места отбора проб пород мишени.

**Fig. 1.** Arrangement of study outcrops. а – geographical position (square); б – geological structure of the area of the Kara astrobleme (fragment of the State Geological Map of the Russian Federation after (Shishkin et al., 2012)); в – the location of the studied outcrops of suevites on the Vanuyta river (в) (Yandex satellite map, oriented similar to fragment “б”).

1–12 – sedimentary deposits (1 – Saayakha sequence: clays, siltstones, redeposited coptoclastites; 2 – Kara coptogenic complex: allogenic breccias, tagamites, suevites, coptoclastites; 3 – Er’yaga formation: sandstones, siltstones, mudstones, coals; 4 – Tab’yu formation: sandstones, aleurolites, argillites, coals; 5 – Liur’yaga formation: sandstones and aleurolites with sandy-calcite concretions; 6 – Petarka formation and Ngebetayakha sequence: argillites with intercalations of siliceous marls, calcareous sandstones and aleurolites; 7 – Chaykin sequence: bryozoan-brachiopod, detrital limestones; 8 – Sartyu and Cementozavodskaya formations: organogenic-detrital limestones, dolomites; 9 – Silovayakha formation: phtanites, black shales, silicites, carbonaceous-siliceous limestones; 10 – Sezymyunkoshor sequence: limestones, dolomite intercalations; 11 – Sopchinskaya formation: limestones and argillaceous-siliceous shales; 12 – Talbeytyvis formation: sandstones, aleurolites, limestones, siliceous-argillaceous shales); 13, 14 – Intrusive formations (13 – Khoitalbey complex of gabbrodolerites and dolerites; 14 – Khengur complex of gabbrodolerites, picrodolerites and dolerites); 15, 16 – Impact rocks (15 – autochthonous rocks, coptocataclases; 16 – allochthonous rocks, suevites, blocky breccias); 17 – boreholes; 18 – borders of astroblemes; 19, 20 – dislocations (19 – thrusts, 20 – shariages); 21–24 – areas of distribution of suevites (21 – suevites of type I, 22 – suevites of type II, 23 – suevites of type III, 24 – suevites of the B. Vanuyta river); 25 – observation points of suevites at the B. Vanuyta river; 26 – sampling sites of target rocks.

алевролиты, сланцы и другие породы нижней перми. Интрузивные образования представлены хенгурскими долеритами и габбро-долеритами верхнего девона, которые в пределах астроблемы имеют немногочисленные выходы в области центрального поднятия (Мащак, 1990а).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материал для исследований отобран в ходе экспедиционных работ на территории Карской астроблемы и ее окружения в 2015, 2017 и 2019 гг. (см. рис. 1). Коллекция включает в себя более 70 образцов зювитов и пород мишени, в том числе штучные образцы, полированные шлифы и порошковые препараты. Анализируемые породы отобраны в среднем течении р. Б. Вануйта, откуда исследовано 12 шлифов зювитов. Для сравнительного анализа с тремя типами зювитов использовались образцы обломочных импактитов, отобранные в бассейнах рр. Анарога (Нганоракхяха), Кара и Сопчаю. Для сопоставления вещественного состава литокластов зювитов и неизменных пород мишени использовались образцы алевролитов, отобранные за пределами Карского кратера – в долинах рр. Халмерью, Саяха, Путью, Анарога и руч. Лавовый (см. рис. 1).

Методика исследований включала в себя полевое и лабораторное изучение зювитов. Геологические и структурно-текстурные особенности пород исследовались в коренных обнажениях и штучках. С помощью оптической микроскопии анализировался литологический состав и структурно-текстурные особенности пород мишени. С исполь-

зованием оптической и электронной сканирующей микроскопии детально изучались петрографические и структурно-текстурные особенности зювитов и их составных компонентов на микроуровне. В зювитах анализировались составляющие обломочных импактитов (Геологический словарь, 2010; Popigai ..., 2019) – обломки пород мишени (литокласты), фрагменты импактного стекла (витрокласты) и тонкодисперсный вмещающий материал (матрикс). В данной работе под витрокластами понимаются стекловатые и раскристаллизованные продукты застывания импактного расплава по (Stöffler, Grieve, 2007).

Петрографические исследования проводились в полированных шлифах под оптическим микроскопом Nikon ECLIPSE E400 POL в проходящем и отраженном свете. Электронно-микроскопическое изучение произведено на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 LMN, оснащенный энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-Max, в шлифах с углеродным напылением. С помощью локального и площадного микронзондового анализа исследовался вещественный состав матрикса, отдельных литокластов и фрагментов импактных стекол зювитов. Анализ распределения основных петрогенных элементов в матрице зювитов производился методом поэлементного энергодисперсионного картирования. Химический состав зювитов и неизменных пород мишени астроблемы изучался с помощью силикатного анализа на 14 компонентов по методике “Силикатные породы. Инструкция № 163-Х” (ВИМС).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Зювиты в среднем течении р. Б. Вануйта образуют массивные коренные выходы по правому и левому берегам реки (см. рис. 1, 2). Обнажения имеют крутые (до субвертикальных) склоны. В верхней части они, как правило, задернованы и перекрыты осыпью дезинтегрированного зювитового материала. В нижней части коренные выходы образуют отчетливо выдающиеся подушкообразные выступы, которые продолжаются в донной части русла. Стенки обнажений разбиты промоинами и грубыми разнонаправленными трещинами на крупные блоки. Мощность выходов достигает 6 м, протяженность – до 160 м. Контакт зювитов с породами мишени и расплавленными импактатами в исследованном районе р. Б. Вануйта не обнаружено.

Зювиты р. Б. Вануйта характеризуются черепитчатой отдельностью, хорошо проявленной в нижних частях обнажений. С выветрелой поверхности они представляют собой хрупкие светло-серые породы, часто с бурыми пятнами гидроокислов железа (см. рис. 2в). По величине кластогенных компонентов породы являются лапиллиевыми, средний размер обломков достигает 1 см (Геологический словарь, 2010).

Петрографические исследования показали, что зювиты имеют витро-лито- и лито-витрокластическую структуру и брекчиевую текстуру. Содержание компонентов в зювитах изменчиво, как правило, в составе преобладают лито- и витрокласты, занимающие по 15–25 об. % каждый; иногда матрикс преобладает, достигая 50–65 об. %, количество кристаллокластов невелико (10–15 об. %). На микроуровне (в шлифах) кластогенные компоненты в целом характеризуются относительно крупными размерами, в среднем около 0.6–1.0 мм.

### Компоненты зювитов

**Литокласты.** В изученных зювитах представлены преимущественно обломками алевролитов, в меньшей степени алевропесчаников и песчаников. Реже отмечаются известняки, аргиллиты, сланцы, единично – угли. Содержание и размер литокластов в зювитах неоднородны, содержание составляет от 15 до 25 об. %, а размеры в шлифах – от 0.2 до 7.0 мм, в среднем – 0.8–0.9 мм.

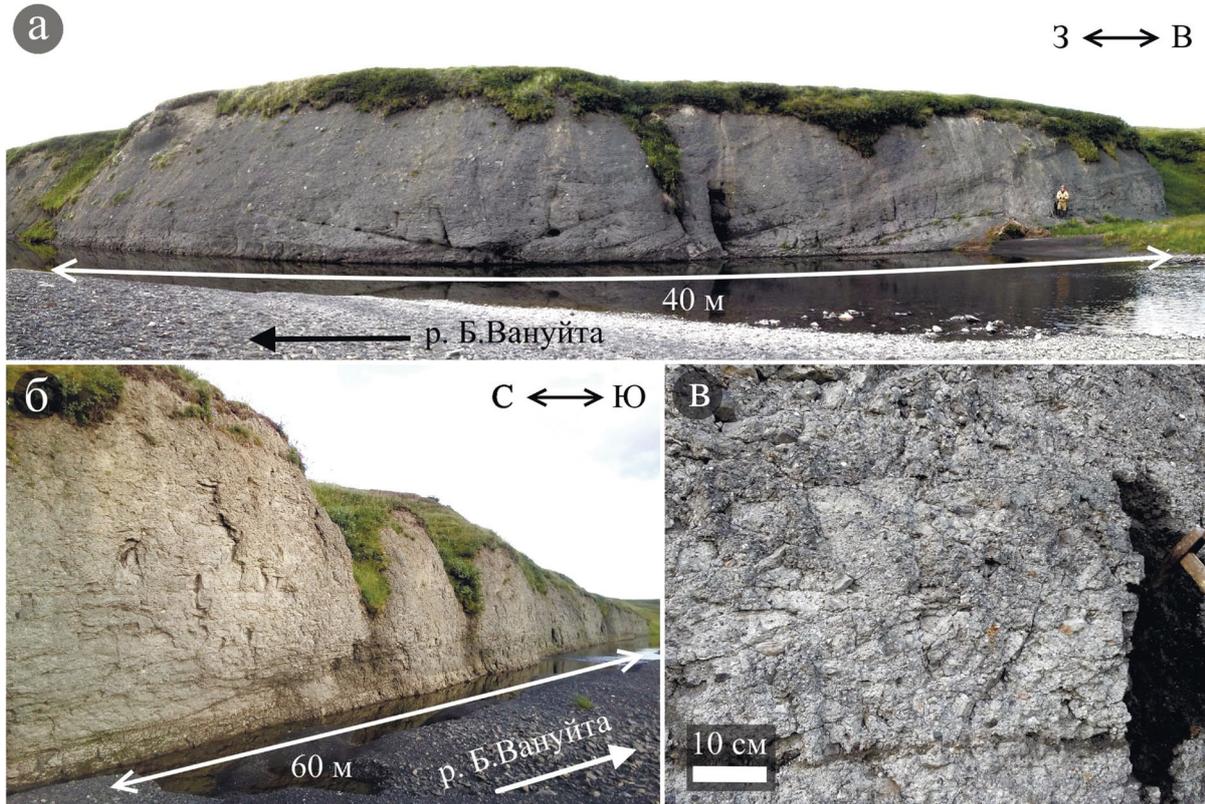
Литоидные фрагменты имеют преимущественно четкие очертания. Морфология и характер границ кластов часто связаны с литологическим составом: алевропесчаники, песчаники и известняки, как правило, изометричные или слабоудлиненные, имеют неровные угловатые контуры; удлиненные, таблитчатые и клиновидные обломки алевролитов, аргиллитов и сланцев, как правило, характеризуются сглаженными очертаниями.

Алевролиты часто известковистые, глинистые коричневатого-серого и коричневого цвета, характеризуются массивной, прерывисто-волнистой и неправильной волнисто-слоистой текстурой. Алевролиты отличаются достаточно однообразным минералогическим составом, они сложены зернами полевых шпатов, кварца и кальцита размером от 0.01 до 0.1 мм и тонкорассеянными глинистыми и слюдястыми минералами в различных соотношениях, иногда содержат хлорит, титанит, пирит и углистые частицы уплощенной таблитчатой формы. Алевропесчаники и песчаники по минеральному составу в целом аналогичны алевролитам, отличаются более крупными размерами зерен (от 0.1 мм). Они полимиктовые, как правило, известковистые, слюдястые или глинисто-слюдястые, характеризуются массивной или неправильной волнисто-слоистой текстурой и нередко пятнистой текстурой за счет присутствия глинистого вещества и частичной витрификации. Известняки глинистые и окремненные, массивные, прозрачные, светло-серого цвета, глинистые известняки – коричневатого-серые. Аргиллиты и сланцы отличаются темным коричневатого-серым, до черного, цветом и сланцеватой текстурой. Редкие черные класты углей имеют кластогенную форму.

По периферии литокластов иногда отмечаются аккреционные каймы темного буровато-коричневого цвета. Обломки алевролитов могут иметь зону изменения, отличающуюся от центральной части окраской (рис. 3а). Часто отдельные зерна или участки в кластах алевропесчаников и песчаников изменены до стекловатого состояния (витрифицированы) – приобретают более темную серую окраску и становятся оптически изотропными (рис. 3б). При этом часто сохраняются первичные очертания витрифицированных зерен и структурно-текстурные особенности исходных пород. Иногда в кластах алевропесчаников, песчаников и сланцев наблюдаются слабопроявленные планарные деформационные элементы (рис. 4).

**Витрокласты.** Как упоминалось выше, содержание и размер витрокластов в зювитах изменчивы. Содержание стекол в породах варьируется от 15 до 25 об. %, их размер в шлифах – от 0.1 мм до 1.0 см и более, в среднем –  $\approx 0.7$  мм.

Форма витрокластов в зювитах весьма разнообразная. В породах преобладают импактные стекла обломочной, угловатой формы, как правило имеющие достаточно ровные очертания. В то же время отмечаются витрокласты неправильной формы, характеризующиеся весьма неровными, извилистыми очертаниями. Среди последних наблюдаются относительно мелкие каплевидные и более крупные изогнутые, скрученные, разветвленные, лепешкообразные и другой формы фрагменты. В редких случаях встречаются импактные стекла в виде каймы, обволакивающей литоидные облом-



**Рис. 2.** Коренные выходы зювитов на р. Б. Вануйта.

а – обнажение зювитов на правом берегу реки (т.н. 76), б – обнажение зювитов на левом берегу реки (т.н. 78), в – зювиты в естественном выходе: выветрелые светло-серые с поверхности и обводненные темно-серые в свежей зачистке (т.н. 76).

**Fig. 2.** Bedrock outcrops of the suevites on the B. Vanuyta river.

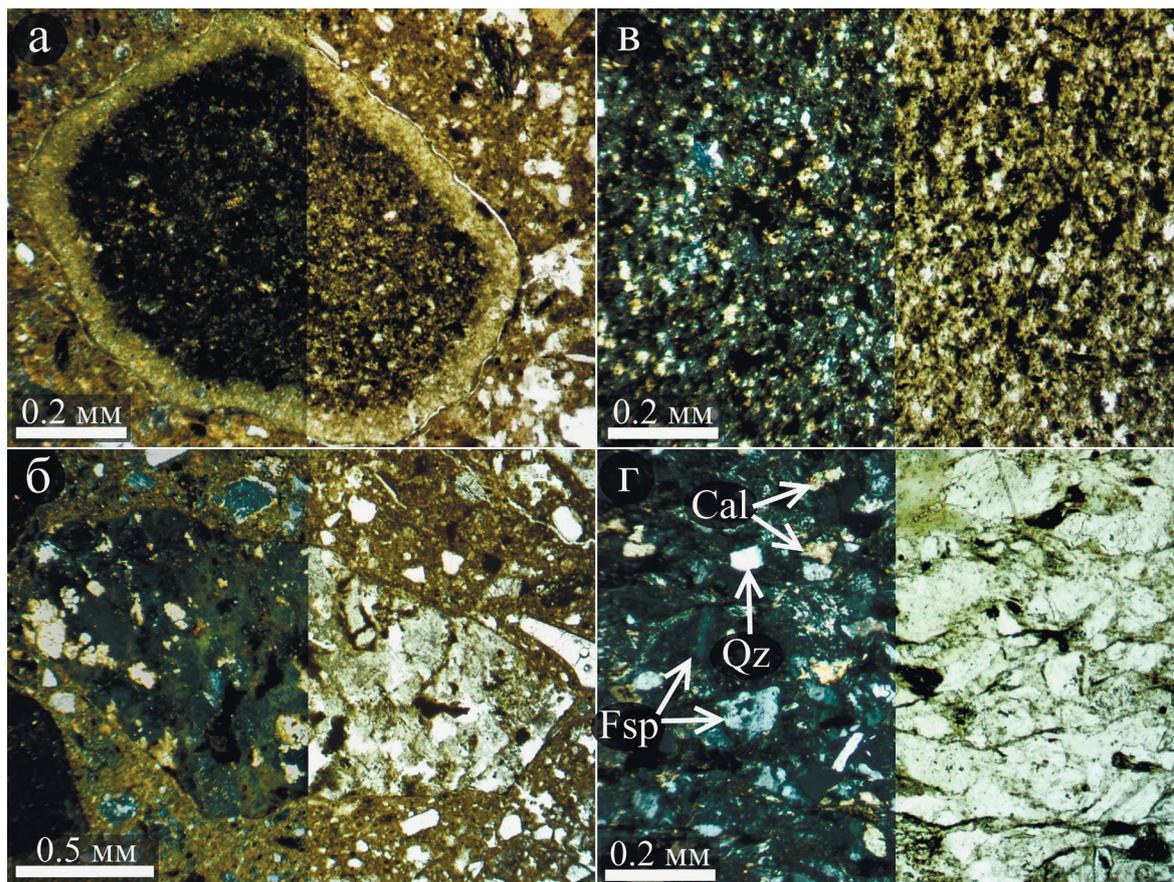
а – outcrop of suevites at the right bank of the river (point 76), б – outcrop of suevites at the left bank of the river (point 78), в – suevites in their natural outcrop: weathered light gray from the surface and flooded dark gray in fresh stripping (point 76).

ки. Изредка присутствуют стекла в виде “бомбочек” аэродинамической (шаро- или каплевидной) формы с резко закаленными границами и полосчато-зональным строением, как бы закрученным вокруг центральной части (рис. 5а). Для таких стекол характерна скорлуповатая отдельность. Размеры подобных образований в изученных образцах не превышают 2.0–2.5 мм.

Среди фрагментов импактных стекол встречаются оптически прозрачные, светло-серые, розовато- или коричневатые (единично – бурые и темно-серые) разновидности с пятнистыми, флюидальными, пористыми, реже массивными текстурами. Иногда стекла имеют хорошо оформленные округлые “трещины усыхания”, обуславливающие их перлитовую текстуру (см. рис. 5а). Наиболее распространены прозрачные и светло-серые импактные стекла. Пористые стекла содержат большое количество пор, которые могут занимать до половины объема, часто формируют неровные, изъеденные границы витрокластов (см. рис. 5в).

Форма пор изометричная, округлая или неправильная. В стеклах с флюидальной текстурой поры, как правило, сильно удлинены, имеют линзообразную форму и расположены по направлению флюидальности. В стеклах отмечаются округлые включения матрикса (см. рис. 5в), изредка поровое пространство залечено сноповидными кристаллами цеолитов.

Характер границ витрокластов различен, у кластогенных стекол преимущественно четкий, закаленный (см. рис. 5а–в), что свидетельствует об их твердом состоянии при литификации зювита. Витрокласты неправильной формы часто имеют неотчетливые, как бы сваренные с матриксом очертания (см. рис. 5г–е), указывающие на горячее и пластичное состояние расплава в момент литификации зювита. При этом любопытно, что разный характер контактов с матриксом может присутствовать в одном и том же фрагменте стекла (см. рис. 5е). Нередко в стеклах присутствуют реликты пород мишени – преимущественно крупные



**Рис. 3.** Литокласты зювитов р. Б. Вануйта (а, б) и исходные породы мишени Карской астроблемы (в, г) (фото полированных петрографических шлифов (правая часть – без поляризатора, левая часть – с поляризатором)).

а – фрагмент мелкозернистого глинистого алевролита с зоной изменения на контакте с матрицсом, б – крупнозернистый известковисто-глинистый алевролит мишени (р. Саяха), в – фрагмент витрифицированного песчаника с реликтовой волнисто-слоистой текстурой, г – алевропесчаник мишени с прерывисто-волнисто-слоистой текстурой (р. Анарога). *Cal* – кальцит, *Fsp* – полевоы шпат, *Qz* – кварц.

**Fig. 3.** Lithoclasts of B. Vanuyta suevites (а, б) and original target rocks of the Kara astrobleme (в, г) (photo of polished petrographic thin sections (right side without a polarizer, left side with a polarizer)).

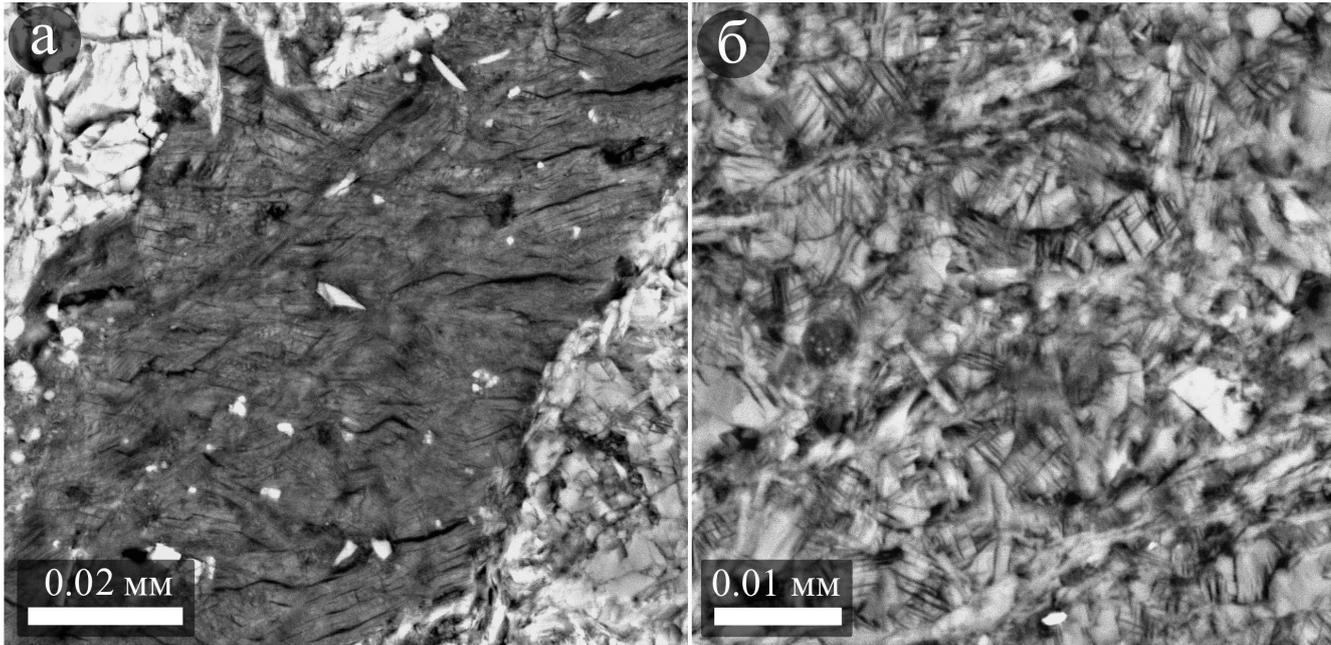
а – a fragment of fine argillaceous aleurolite with a zone of alteration at the contact with the matrix, б – coarse-grained calcareous-argillaceous aleurolite of the target (Sayakha River), в – a fragment of vitrified sandstone with a relic wavy-layered texture, г – aleurosandstone of the target with discontinuous wavy-layered texture (Anaroga river). *Cal* – calcite, *Fsp* – feldspar, *Qz* – quartz.

(0.5–1.0 мм и более) фрагменты алевролитов, песчаников и сильноизмененных минералов (кварца, полевых шпатов), включения кальцита.

Отдельно следует упомянуть довольно широко распространенные в зювитах класты интенсивно ударно-метаморфизованных пород – витрифицированных алевролитов, алевропесчаников, песчаников и сланцев, которые, в отличие от импактных стекол, существенно или частично сохраняют свои исходные структурно-текстурные особенности (см. рис. 3б). Такие фрагменты идентифицируются по темному серому или коричневому цвету, обломочной форме и оптической изотропности.

**Матрикс.** Оптически матрикс зювитов р. Б. Вануйта представляет собой достаточно однородную тонкодисперсную преимущественно глинистую массу коричневого и участками светло-коричневого цвета. Содержание матрикса в зювитах изменяется от 40 до 65 об. %.

Матрикс зювитов имеет интенсивно спекшийся характер (рис. 6), образует массу плотного строения с низким содержанием порового пространства. Поры в матриксе редкие, изолированные, некрупные (до 5–10 мкм), часто изометричные, имеют правильную округлую форму. Матрикс выполнен мельчайшими (1–5 мкм) реликтами спекшихся минеральных частиц и относитель-



**Рис. 4.** Признаки импактного метаморфизма в зювитах р. Б. Вануйта.

а – системы планарных деформационных элементов в кварце из фрагмента песчаника, б – планарные элементы в кварце из фрагмента интенсивно измененного углисто-кремнистого сланца. Электронно-микроскопические изображения в режиме отраженных электронов.

**Fig. 4.** Features of impact metamorphism in suevites of B. Vanuyta River.

а – systems of planar deformation elements in quartz from a sandstone fragment, б – planar elements in quartz from a fragment of altered carboniferous siliceous shale. Backscattered electron images.

но более крупными (5–50 мкм) минеральными кластами и их спекшимися агрегатами.

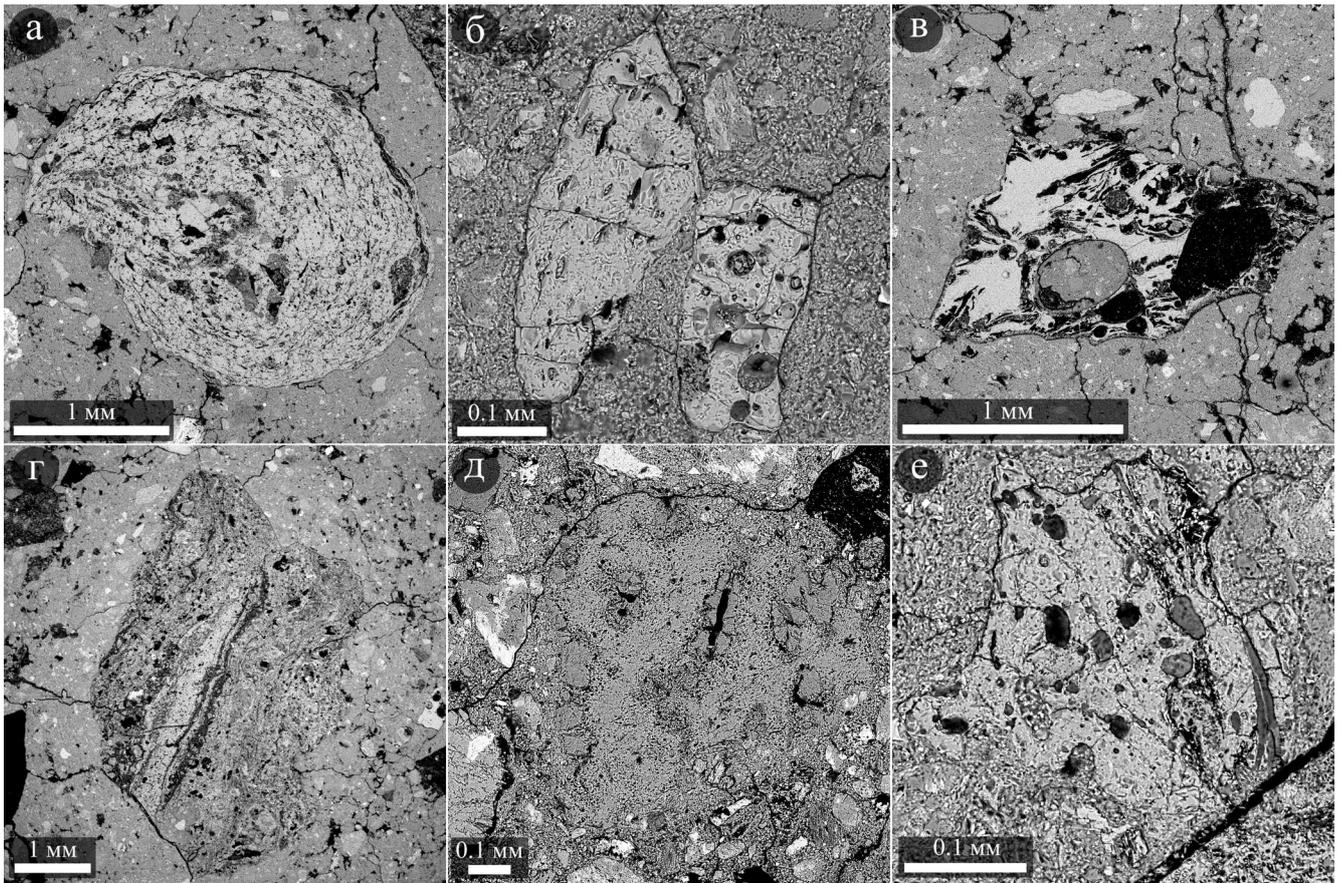
Минеральные фрагменты в матрице зювитов представлены полевыми шпатами (большой частью кислым плагиоклазом – альбитом), кварцем, кальцитом, хлоритом, мусковитом и серицитом, глауконитом, титанитом (см. рис. 6). В матрице повсеместно развиты мелкие ( $\approx 1\text{--}10$  мкм) реликтовые фрамбоиды пирита, изредка – биотит (в ассоциации с хлоритом), фрагменты апатита, эпидота, ильменита, частицы углистого вещества. В целом более крупные и угловатые фрагменты с четкими очертаниями представлены кварцем, реже – полевыми шпатами. Довольно часто встречаются органические остатки.

Анализ распределения петрогенных компонентов показал, что основная часть матрикса представлена железистыми и магнезиальными алюмосиликатами (рис. 7), что хорошо согласуется с широким развитием в нем хлорита. Выявленное распределение калия, по всей видимости, определяется присутствием слюдистых минералов в матрице (в особенности мусковита). Локально высокие концентрации кальция и титана, судя по всему, обусловлены вкрапленниками титаниста и кальцита.

### Петрохимический состав зювитов

В целом зювиты р. Б. Вануйта характеризуются достаточно выдержанным содержанием основных петрогенных компонентов (табл. 1). Породы содержат от 57.02 до 58.86 мас. %,  $\text{SiO}_2$  и по концентрации кремнекислоты относятся к среднекислым разностям. По уровню содержания щелочей зювиты могут быть отнесены к породам нормальной щелочности:  $\text{Na}_2\text{O}$  – от 1.56 до 1.72,  $\text{K}_2\text{O}$  от 1.73 до 2.08 мас. %. Остальные компоненты, вес. %:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 12.38–13.93,  $\text{MgO}$  – 3.84–4.4,  $\text{CaO}$  – 3.72–4.34,  $\text{FeO}$  – 3.17–3.59,  $\text{H}_2\text{O}$  – 2.14–2.51,  $\text{CO}_2$  – 1.81–2.43. В незначительном количестве установлены  $\text{TiO}_2$  (0.78–0.89),  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0.15–0.21) и  $\text{MnO}$  ( $\approx 0.1$  мас. %).

С помощью площадного микрозондового анализа в зювитах исследован состав обломочных (табл. 2) и расплавных (табл. 3) компонентов. Проанализирован состав преобладающих типов литокластов зювитов, представленных алевролитами. В исследованных кластах содержание кремнезема составляет от 54.7 до 60.2 мас. %, а концентрация глинозема – от 13.9 до 16.7 мас. % (см. табл. 2). Обращает на себя внимание тот факт, что для изученных фрагментов алевролитов свойственно достаточно высокое содержание оксида железа – от 6 до 7.3 мас. %. При этом



**Рис. 5.** Многообразие импактных стекол зювитов р. Б. Вануйта (электронно-микроскопические изображения в режиме отраженных электронов).

а–в – *витрокласты с резко закаленными очертаниями*: а – “бомбочка” стекла с полосчато-зональным строением и перлитовой текстурой; б – кластогенные стекла (во фрагменте слева частично сохранилась аэродинамическая лепешкообразная форма); в – пористое стекло с крупным включением матрикса; г–е – *стекла с неотчетливыми очертаниями*: г – крупный фрагмент флюидального стекла с извилистыми очертаниями, д – стекло с “горячим” характером контакта с матриксом, е – фрагмент пористого стекла неправильной формы.

**Fig. 5.** Variety of impact glasses of B. Vanuyta suevites (backscattered electron images).

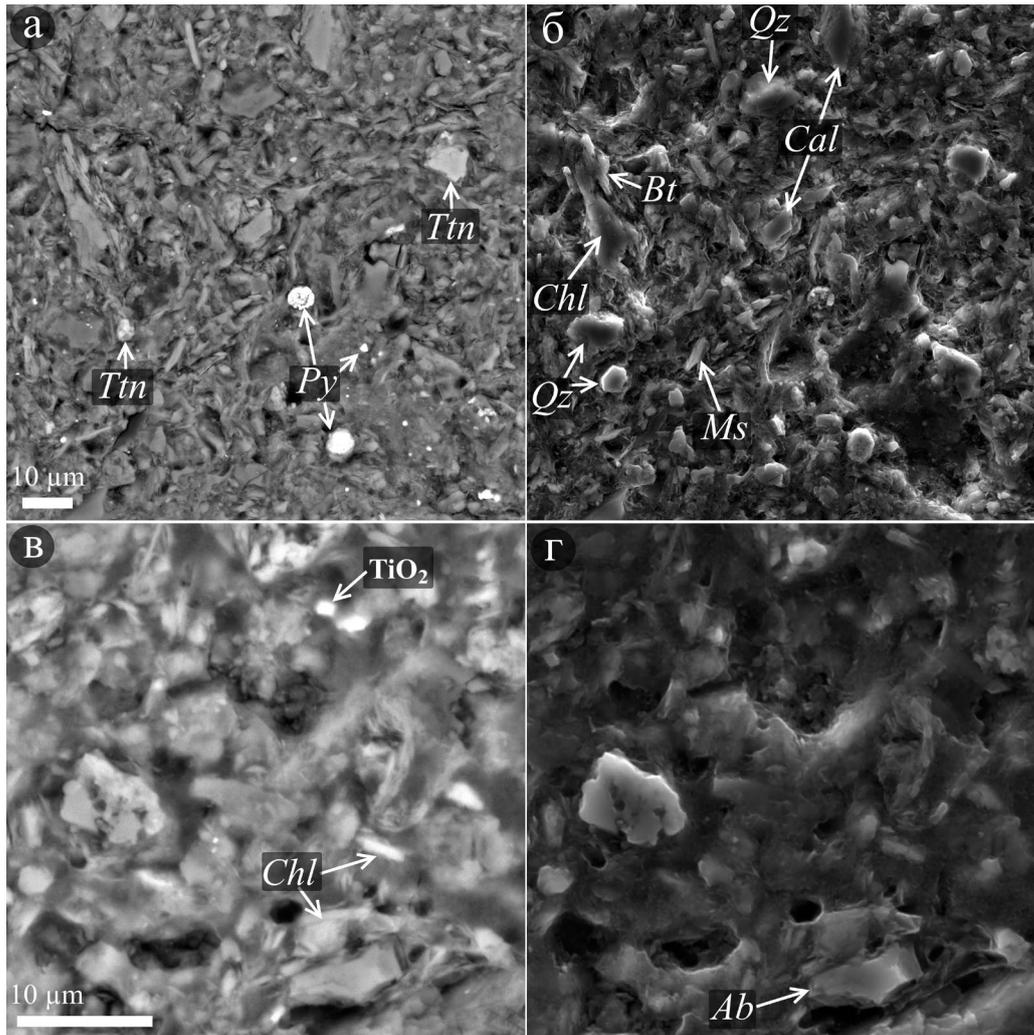
а–в – *vitroclasts with sharply hardened outlines*: а – glass “bomb” with a banded-zonal structure and perlitic texture; б – clastogenic glasses (aerodynamic oblate shape is partially preserved in the fragment on the left); в – porous glass with a large matrix inclusion; г–е – *glasses with indistinct outlines*: г – large fragment of fluidal glass with sinuous outlines, д – glass with a “hot” nature of contact with the matrix, е – fragment of porous glass of irregular shape.

концентрация оксида магния в кластах алевролитов составляет от 3.8 до 4.9 мас. %. Исследованные литокласты имеют широкие вариации состава по содержанию оксида кальция – от 1.3 до 3.8 мас. %.

Фрагменты импактных стекол в зювитах характеризуются среднекислым составом с содержанием кремнезема от 54.8 до 61.5 мас. % и глинозема от 11.9 до 15.6 мас. % (см. табл. 3). Витрокласты имеют довольно широкий разброс содержаний и, в целом, повышенную концентрацию компонентов, мас. %: FeO – 3.9–7.4, MgO – 2.6–5.3 и CaO – 0.7–5.1, и относительно низкое содержание оксидов щелочей: Na<sub>2</sub>O – 2.4–3.3 и K<sub>2</sub>O – 1.6–2.2.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Особенности распространения зювитов в пределах ударного кратера ранее рассматривались в ряде работ, посвященных импактитогенезу в целом (Фельдман, 1990; Stöffler et al., 2018), а также импактитам отдельных ударных структур – кратера Рис (Stöffler et al., 2013), Попигайской астроблемы (Масайтис и др., 1998), Карской структуры (Селивановская и др., 1990), кратера Жаманшин (Sergienko et al., 2021) и других. Как правило, структурно-текстурные различия зювитов связывают с различиями фациальной обстановки формирования (Ser-



**Рис. 6.** Электронно-микроскопические изображения матрикса зювитов р. Б. Вануйта.

а, в – в режиме отраженных электронов (BSE); б, г – в режиме вторичных электронов (SE). *Ab* – альбит, *Bt* – биотит, *Cal* – кальцит, *Chl* – хлорит, *Ms* – мусковит, *Py* – пирит, *Ttn* – титанит, *Qz* – кварц.

**Fig. 6.** Electron microscopic images of B. Vanuyta matrix suevites.

а, в – backscattered electron image (BSE), б, г – secondary electrons image (SE). *Ab* – albite, *Bt* – biotite, *Cal* – calcite, *Chl* – chlorite, *Ms* – muscovite, *Py* – pyrite, *Ttn* – titanite, *Qz* – quartz.

gienko et al., 2021, Stoffler et al., 1979). Согласно В.И. Фельдману, изменения физико-механических и физико-химических условий образования пород должны отражаться на фациальных признаках. Он выделял пять фаций импактитов по местоположению в кратере: цокольную, донную, фацию внутрикратерных выбросов (аэродинамическую), фацию ближних закратерных выбросов и фацию тектитов, представленную дальними выбросами импактно-расплава (Фельдман, 1990). При этом фациальная характеристика зювитов ранее рассматривалась фрагментарно, вероятно, ввиду отсутствия достаточно информативных взаимоотношений раз-

новидностей импактитов в коренном залегании в изучаемых объектах (Sergienko et al., 2021), что не позволяло сформировать достаточно полный комплекс критериев для характеристики данного специфического типа горных пород. Последний является особенно важным для петрографической диагностики фаций зювитов при изучении строения кратеров по скважинному материалу, в том числе для погребенных ударных структур.

На территории Карской астроблемы наблюдаются обширные коренные выходы зювитов в непосредственных контактах с расплавленными импактитами (тагамитами), а также зювиты с разными

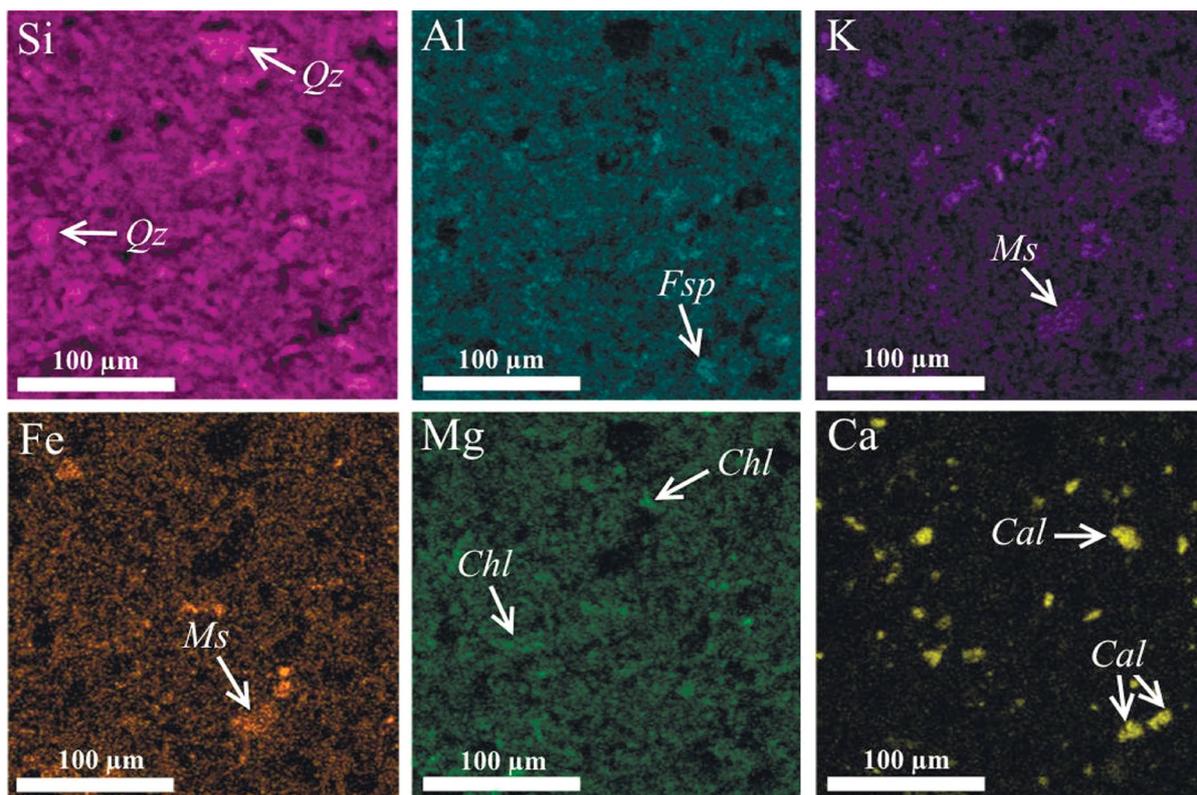


Рис. 7. Карты распределения основных химических элементов в матриксе зювитов р. Б. Вануйта.

Fig. 7. Elemental maps of matrix of the B. Vanuyta suevites.

Таблица 1. Петрохимический состав зювитов района р. Б. Вануйта (силикатные анализы) мас. %

Table 1. Petrochemical composition of suevites of the B. Vanuyta river (silicate analyses) wt %

Компонент	Образцы					Среднее содержание
	Кр19-75-558	Кр19-76-560	Кр19-76-560a	Кр19-77-562	Кр19-78-563	
SiO <sub>2</sub>	58.86	58.03	58.28	57.5	57.02	57.94
TiO <sub>2</sub>	0.78	0.85	0.81	0.87	0.89	0.84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.17	12.38	13.93	12.86	13.1	13.09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ	5.96	6.4	6.37	6.4	6.48	6.32
MnO	0.09	0.12	0.09	0.1	0.1	0.1
CaO	4.17	4.34	3.72	4.22	4.11	4.11
MgO	3.84	4.4	4.4	4.29	4.38	4.26
K <sub>2</sub> O	1.82	1.73	1.75	1.78	2.08	1.83
Na <sub>2</sub> O	1.62	1.56	1.63	1.7	1.72	1.65
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.15	0.2	0.16	0.21	0.19	0.18
П.п.п.	9.1	9.03	8.78	8.77	9.17	8.97
Сумма с п.п.п.	99.56	99.04	99.92	98.7	99.24	99.29
FeO	3.17	3.54	3.59	3.26	3.42	3.4
H <sub>2</sub> O	2.14	2.3	2.51	2.22	2.43	2.32
CO <sub>2</sub>	2.43	2.2	1.89	2.19	1.81	2.1

**Таблица 2.** Петрохимический состав кластов алевролитов в зювитах бассейна р. Б. Вануйта (площадные микрозондовые анализы) мас. %**Table 2.** Petrochemical composition of siltstone layers in the suevites of the basin of the river B. Vanuyta (areal microprobe analyses) wt %

Образцы	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Сумма
Кр-76-559/11_S1	54.32	0.88	13.9	6.44	4.75	3.84	1.98	2.14	88.26
Кр-76-559/13_S1	58.57	0.86	15.52	7.22	3.97	1.72	2.5	2.23	92.58
Кр-76-559/13_1_S2	57.79	0.73	16.74	6.69	4.73	1.3	2.93	2.96	93.87
Кр-76-559/13_1_S1	60.18	0.54	14.21	5.96	3.81	3.67	2.25	2.29	92.92
Кр-76-559/14_S2	55.51	1.27	14.78	7.25	4.08	3.48	2.29	2.22	90.89
Кр-77-562/20_S1	54.68	0.99	14.61	6.73	4.15	2.87	2.13	2.08	88.23
Кр-77-562/22_S1	58.22	1.03	15.25	6.19	4.18	2.62	1.89	2.75	92.55
Кр-77-562/25_S1	56.93	0.84	15.73	6.86	4.88	2.88	2.37	2.09	92.58

**Таблица 3.** Петрохимический состав фрагментов импактных стекол в зювитах бассейна р. Б. Вануйта (площадные микрозондовые анализы) мас. %**Table 3.** Petrochemical composition of fragments of impact glasses in the suevites of the river B. Vanuyta basin (areal microprobe analyses) wt %

Образцы	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Сумма
Кр-76-559/4_1_S1	60.6	0.82	15.55	6.91	5.11	4.65	3.23	2.02	98.89
Кр-76-559/5_1_S1	60.09	0.64	14.04	6.0	4.14	0.72	2.9	1.95	90.47
Кр-76-559/6_1_S1	58.02	0.6	12.26	3.95	2.61	2.73	2.35	2.15	84.67
Кр-76-559/7_1_S1	58.24	0.97	14.9	6.56	4.67	4.12	3.05	2.0	94.52
Кр-76-559/8_1_S1	54.81	0.85	14.39	3.86	2.71	4.23	3.04	1.62	85.5
Кр-76-559/10_1_S1	61.55	0.96	15.44	6.55	5.14	4.81	3.09	1.89	99.44
Кр-77-562/8_1_S1	60.22	0.91	14.88	6.32	4.76	4.65	3.31	2.1	97.16
Кр-77-562/8_2_S1	65.8	0.75	11.88	5.66	3.91	3.33	2.76	1.93	96.01
Кр-77-562/9_S1	58.19	0.91	14.9	7.43	5.28	4.42	2.93	2.01	96.07
Кр-77-562/10_1_S1	60.29	0.96	15.08	6.36	5.13	4.87	3.31	2.03	98.02
Кр-77-562/10_2_S1	60.7	0.94	15.6	6.7	4.94	5.1	3.13	2.03	99.14
Кр-77-562/10_2_S2	56.29	0.91	14.32	6.57	4.58	4.58	2.67	2.13	92.04
Кр-77-562/10_3_S1	58.65	0.81	14.1	6.25	4.59	4.04	2.75	1.91	93.1
Кр-77-562/11_S1	57.32	0.88	14.59	6.53	4.4	4.57	3.1	1.96	93.35
Кр-77-562/12_S1	55.92	0.88	14.62	7.25	4.93	4.69	2.71	1.79	92.8
Кр-77-562/13_S1	59.75	0.85	14.82	5.73	4.2	4.21	3.14	1.91	94.84
Кр-77-562/13_1_S1	59.6	0.99	15.3	6.44	4.73	4.77	3.22	1.97	97.02

структурно-текстурными характеристиками в пределах одного и того же обнажения (Максименко, Шумилова, 2022). Это позволяет не только выделить, но и охарактеризовать разные фации зювитов полным диагностическим комплексом критериев, который может быть использован при изучении других астроблем. Результаты исследований зювитов р. Б. Вануйта способствуют более целостной характеристике фаціальных особенностей зювитов Карской астроблемы и подтверждают спра-

ведливость фаціального деления зювитов и импактитов в целом.

Выявленные структурно-текстурные и петрохимические особенности позволяют выяснить специфику типизации обломочных импактитов р. Б. Вануйта на основе сравнения с выявленными ранее тремя типами зювитов Карской астроблемы (табл. 4), а также дают возможность установить фаціальные особенности и положение изученных зювитов в структуре коптогенного комплекса кратера в целом.

**Таблица 4.** Характеристика составных компонентов зювитов р. Б. Вануйта и трех типов зювитов Карской астроблемы, по (Максименко, Исаенко, 2019; Максименко и др., 2020; Максименко, Шумилова, 2022)

**Table 4.** Characteristics of the rock components of suevites of the river B. Vanuyta and three types of suevites of the Kara astrobleme by (Maksimenko, Isaenko, 2019; Maksimenko et al., 2020; Maksimenko, Shumilova, 2022)

Характеристики составных компонентов	Зювиты р. Б. Вануйта	Зювиты I типа (р. Анарога)	Зювиты II типа (р. Кара)	Зювиты III типа (р. Сопчаю)
<b>Литокласты</b>				
Содержание, об.%	15–25	16–24	23–28	19–24
Размер в шлифах, см	0.02–0.7	0.01–1.5	0.01–2	0.001–1.5
Состав	Алевролиты, в меньшей степени алевропесчаники и песчаники, реже известняки, аргиллиты, сланцы, единично угли	Алевролиты, песчаники и алевропесчаники, аргиллиты, реже сланцы, редко известняки и силициты	Сланцы, известняки, в меньшей степени песчаники, алевролиты, силициты и угли	Сланцы, угли, в меньшей степени алевролиты, известняки, песчаники, силициты (яшмоиды, кварциты, реже радиолариты) единично кварцевые долериты
<b>Витрокласты</b>				
Содержание, об.%	15–25	25–30	4–15	6–11
Размер в шлифах, см	0.01–1.1	0.01–1	0.07–0.4	0.006–0.5
Цвет	Светло-серый, реже розовато- и коричневатосерый, редко бурый и темно-серый	Светло- и темно-коричневый	Желтовато-серый, зеленовато-коричневатосерый	Светло-желтый, коричневатобурый, иногда светло-голубовато-серый
Форма	Преимущественно угловатая, изометричная, реже аэродинамическая – каплевидная, скрученная, удлиненная лепешкообразная, в виде “бомбочек”; иногда неправильная	Неправильная – причудливая ленто- и кляксообразная, удлиненная, пламенивидная	Преимущественно изометричная, аэродинамическая – лепешки, лапилли, ленты, каплевидные и другие образования; угловатая, неправильная	Угловатая, таблитчатая, клиновидная; неправильная изометричная слабоокруглая, изредка паутино- и лентообразная; аэродинамическая лепешкообразная, изогнутая, каплевидная
Очертания	Преимущественно ровные, иногда неровные, бугристые, рваные	Неровные – извилистые, пламенивидные, расщепленные	Преимущественно неровные – бугристые, волнистые	Как ровные, так и неровные – волнистые, “изъеденные”, бугристые
Характер контактов с матриксом	Преимущественно четкий, реже неотчетливый, спекшийся	Нечеткий, спекшийся	Преимущественно четкий, в меньшей степени нечеткий, спекшийся	Четкий
Текстура	Пятнистая, флюидальная, пористая (поры до 50 об. %), реже массивная, иногда скорлуповатая	Флюидальная, массивная, полосчатая, иногда пористая (поры до 20 об. %), изредка очковая	Пятнистая, массивная, реже пористая (поры до 40 об. %) и флюидальная, изредка комковатая и очковая	Массивная, пористая, пузыристая (поры до 60 об. %), флюидальная, реже пятнистая и глобулярная
<b>Матрикс</b>				
Содержание, об.%	40–65	44–50	49–57	56–64
Цвет	Коричневый и светло-коричневый	Желтовато-коричневый, рыжеватокоричневый	Серый, темно-серый	Коричневато-серый
Минеральный состав	Полевой шпат (преимущественно альбит), кварц, кальцит, хлорит, мусковит, глауконит, титанит, пирит. Изредка биотит, апатит, эпидот, ильменит, углеродистое вещество	Полевой шпат (анортотлаз, калиевый полевой шпат), кварц, пироксен, углеродистое вещество, смектит, хлорит, кальцит, рутил, пирит, титанит, титаномагнетит	Кварц, полевой шпат (преимущественно альбит), кальцит, углеродистое вещество, мусковит, апатит, хлорит, пирит, магнетит, анатаз	Кварц, полевой шпат (преимущественно ортоклаз), углеродистое вещество, мусковит, пренит
Содержание пор, об.%	Относительно низкое – 2–5	Относительно низкое – 1–3	Относительно низкое – 5–8	Относительно высокое – 15–20
Размер пор, мкм	До 10	До 10	До 20	До 60
Форма и тип пор	Поры изометричные, правильной округлой формы, изолированного типа	Поры округлой формы, изолированные	Поры преимущественно неправильной формы, замкнутого и открытого типа	Поры неправильной формы, вытяженные, открытого типа

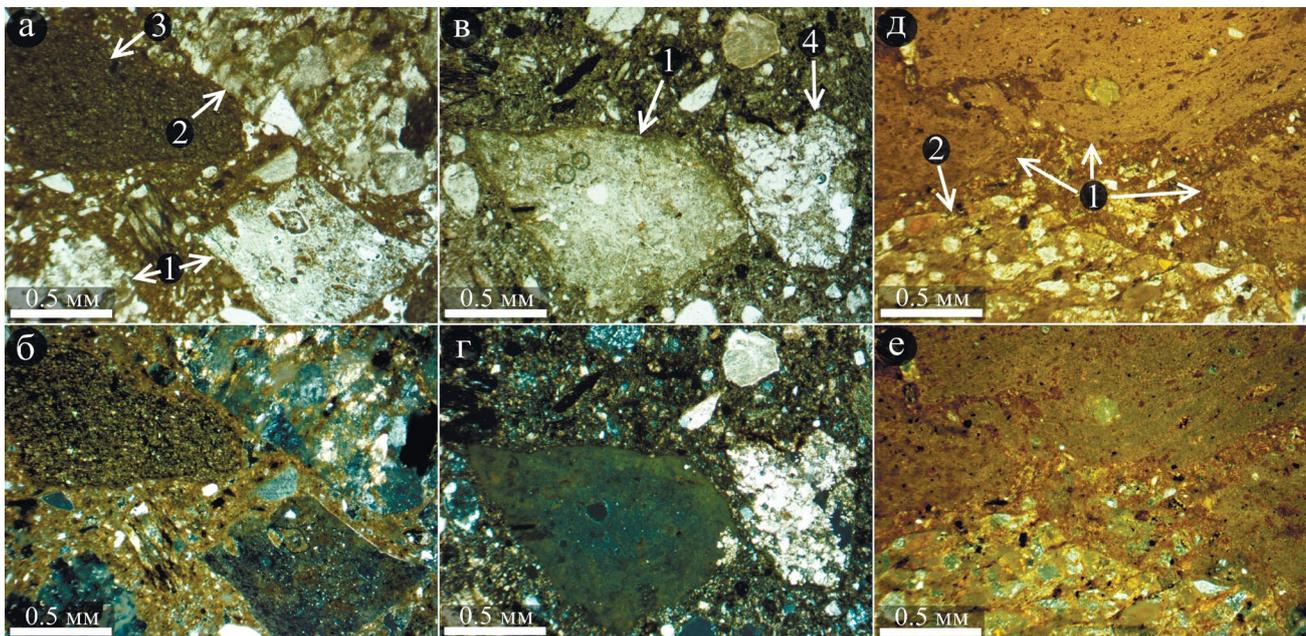
### Компоненты зювитов

**Литокласты.** По петрографическому составу – преобладанию кластов алевролитов и алевропесчаников, – зювиты р. Б. Вануйта близки зювитам I типа; сходны с зювитами II типа существенным количеством обломков известковистых пород (Максименко и др., 2020) (рис. 8, табл. 4). При этом в сравнении с зювитами I типа в составе зювитов р. Б. Вануйта выявлена существенно лучшая сохранность и большее разнообразие литотипов пород мишени, а в сравнении с зювитами II типа – меньшее содержание обломков карбонатных пород (см. рис. 8).

Класты алевролитов и алевропесчаников в зювитах р. Б. Вануйта и соответствующие неизменные породы мишени астроблемы в целом характеризуются сходными структурно-текстурными характеристиками и минералогическим составом. Вместе с тем литокласты зювитов, в отличие от исходных пород, в ряде случаев имеют особенности, указывающие на их интенсивное преобразование. К числу таких особенностей, как указывалось выше, относятся потемнение, появление зональности, наличие планарных элементов и витрификация отдельных зерен и участков, вплоть до полного остеклования литокластов (см. рис. 3).

В результате сравнительного анализа вещественного состава кластов алевролитов в рассматриваемых разновидностях зювитов с потенциальными прототипами неизменных пород мишени астроблемы установлено сходство их петрохимического состава (рис. 9). Литокласты и породы мишени характеризуются близостью вещественного состава по содержанию главных породообразующих компонентов  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Класты алевролитов в зювитах так же, как исходные алевролиты мишени, характеризуются довольно выдержанными концентрациями оксидов щелочей и магния, близки неизменным породам по содержанию оксида кальция. При этом литокласты в зювитах, в отличие от исходных алевролитов мишени, в целом характеризуются несколько более высоким содержанием оксида железа (см. рис. 9).

Установленная близость составов исследованных литокластов и неизменных пород мишени свидетельствует об их генетической связи, что позволяет рассматривать алевролиты в качестве преобладающего протолита зювитов р. Б. Вануйта. Выявленные незначительные расхождения петрохимического состава импактокластов и неизменных пород по содержанию оксида железа, судя по всему, обусловлены постимпактным гидро-

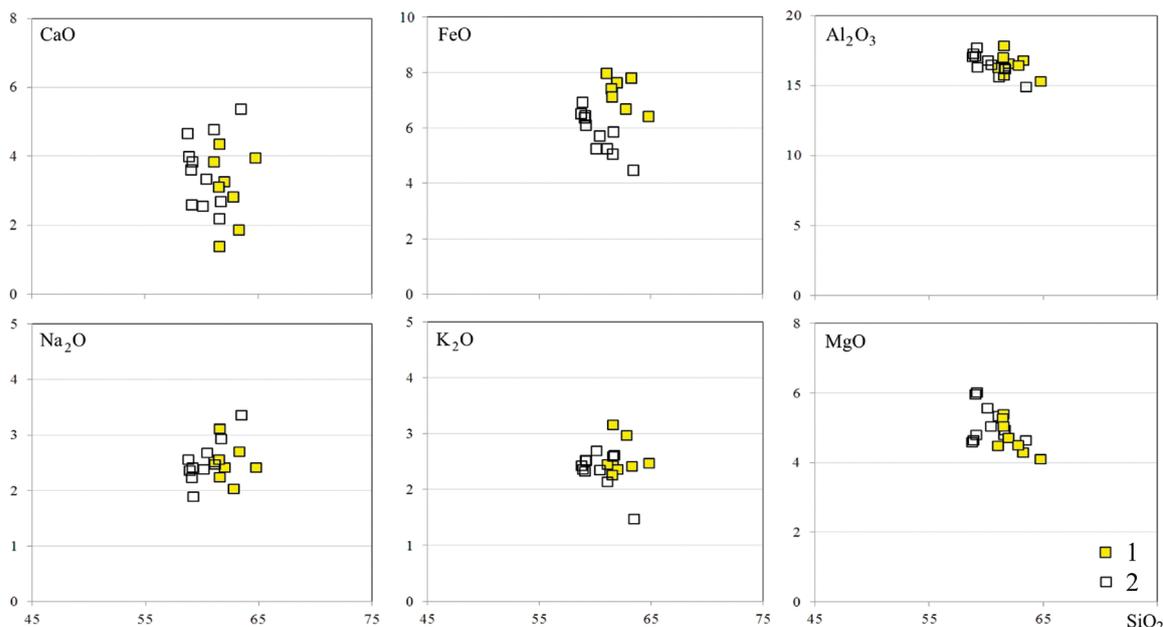


**Рис. 8.** Фото полированных петрографических шлифов зювитов Карской астроблемы в проходящем свете (а, в, д – без поляризатора; б, г, е – с поляризатором).

а, б – зювиты р. Б. Вануйта; в, г – зювиты II типа; д, е – зювиты I типа. 1 – импактные стекла, 2–4 – литокласты (2 – песчаник, 3 – алевролит, 4 – известняк).

**Fig. 8.** Image of polished petrographic thin sections of suevites of the Kara astrobleme in transmitted light (а, в, д – without a polarizer; б, г, е – with a polarizer).

а, б – B. Vanuyta suevites; в, г – type II of the suevites; д, е – type I of the suevites. 1 – impact glass, 2–4 – lithoclasts (2 – sandstone, 3 – aleurolite, 4 – limestone).



**Рис. 9.** Вариационные диаграммы химического состава литокластов зювитов р. Б. Вануйта (площадные микрозондовые анализы) и исходных осадочных пород окружения Карской астроблемы (данные силикатных анализов по (Ковальчук, Шумилова, 2020), нормированные без учета п.п.п.), мас. %.

1 – класты алевролитов в зювитах р. Б. Вануйта, 2 – алевролиты мишени.

**Fig. 9.** Variation diagrams of the chemical composition of lithoclasts of the B. Vanuyta river suevites (areal microprobe analyzes) and original sedimentary rocks of the area of the Kara astrobleme (data of silicate analyzes according to (Koval'chuk, Shumilova, 2020a), normalized without considering ignition loss), wt %.

1 – siltstone clusters in the suevites of the B. Vanuyta, 2 – target siltstone.

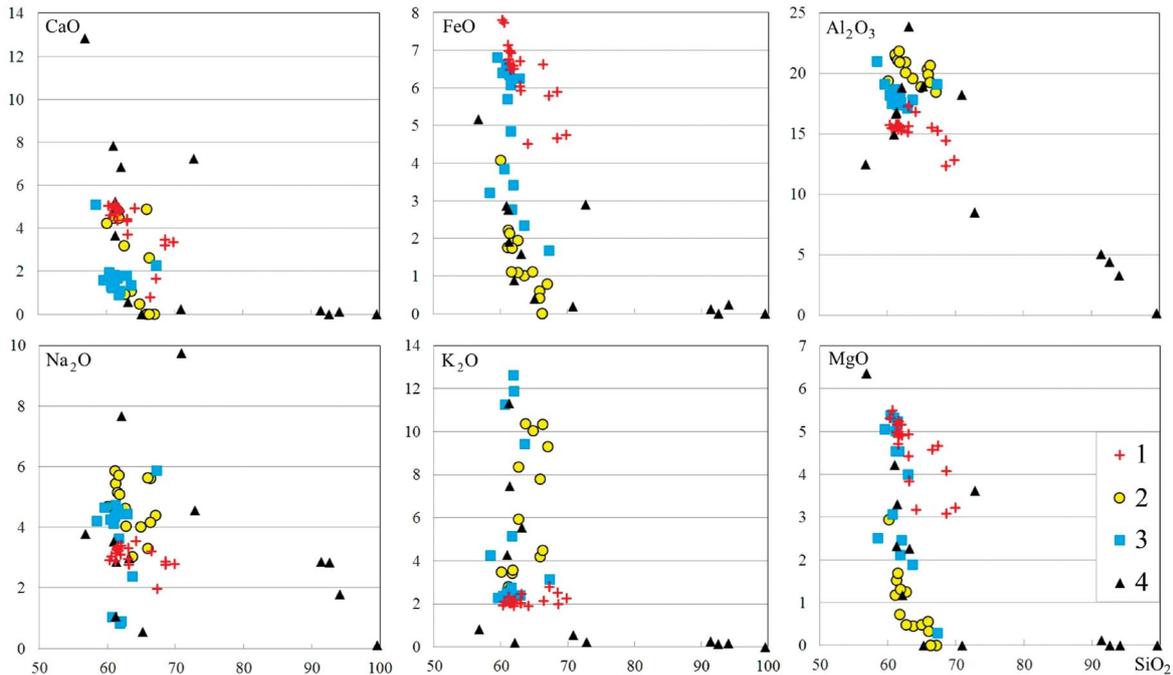
термальным преобразованием зювитов с интенсивным развитием в них гидроксидов железа. Выявленные признаки импактного метаморфизма – системы планарных деформационных элементов в кварце песчаников и сланцев, по (Stöffler, Grieve, 2007), указывают на умеренную ударную нагрузку с давлением от 20 до 35 ГПа и постимпактной температурой от 170 до 300°C.

**Витрокласты.** По морфологии и структурно-текстурным особенностям фрагменты импактных стекол в зювитах р. Б. Вануйта имеют сходство с витрокластами зювитов II типа (см. рис. 8а–г, табл. 4 (Максименко и др., 2020)), характеризуются относительно крупными размерами, имеют аэродинамическую и угловатую форму, преимущественно пятнистую и пористую текстуру, часто содержат включения кальцита, могут иметь как резкозакаленные, так и неотчетливые очертания. При этом витрокласты зювитов р. Б. Вануйта в целом имеют более светлую окраску, обладают светло-серым цветом, в отличие от импактных стекол зювитов II разновидности, которые, как правило, коричневатого или желтовато-серые. В сравнении с зювитами I типа в зювитах р. Б. Вануйта содержание импактных стекол существен-

но ниже, при этом в зювитах I разновидности они в большинстве своем имеют неправильную форму и флюидальную текстуру. В отличие от импактных стекол зювитов III типа (Максименко и др., 2020) витрокласты анализируемых пород более однообразны по своим структурно-текстурным особенностям и морфологии.

По вещественному составу витрокласты зювитов р. Б. Вануйта близки импактным стеклам зювитов II типа и имеют некоторое сходство с витрокластами зювитов I типа (Максименко и др., 2020). В импактных стеклах зювитов р. Б. Вануйта содержание  $\text{SiO}_2$  соответствует содержанию кремнезема в импактных стеклах зювитов I типа (рис. 10).

Импактные стекла зювитов р. Б. Вануйта по содержанию FeO и MgO близки витрокластам зювитов II типа, а по концентрации CaO – сходны со стеклами зювитов I типа (см. рис. 10). Витрокласты зювитов р. Б. Вануйта характеризуются относительно низким содержанием оксидов щелочей и в целом довольно выдержанным составом по концентрации данных компонентов, о чем можно судить по хорошо локализованным полям их фигуративных точек на вариационных диаграммах (см. рис. 10). По содержанию оксида калия импактные



**Рис. 10.** Вариационные диаграммы основных петрогенных компонентов ударных стекол зювитов Карской астроблемы (площадные микрозондовые анализы), вес. %.

Импактные стекла зювитов: 1 – р. Б. Вануйта, 2 – I типа, 3 – II типа, 4 – III типа.

**Fig. 10.** Variation diagrams of main petrogenic components of impact glasses of suevites of the Kara astrobleme (areal microprobe analyses), wt %.

Impact glasses of the suevites: 1 – of the B. Vanuyta river, 2 – of the I type, 3 – of the II type, 4 – of the III type.

стекла изученных зювитов близки группе низкокальциевых стекол зювитов II типа (см. рис. 10). По окиси натрия однозначного соответствия изученных ударных стекол с витрокластами определенного типа зювитов не наблюдается. Поле фигуративных точек  $\text{Na}_2\text{O}$  витрокластов зювитов р. Б. Вануйта имеет перекрытия с полями витрокластов трех типов зювитов. Поле распространения фигуративных точек витрокластов зювитов р. Б. Вануйта по содержанию глинозема частично перекрывает поле ударных стекол зювитов II типа, что также сближает анализируемые породы с вышеуказанным типом зювитов (см. рис. 10).

Близость структурно-текстурных особенностей ударных стекол зювитов р. Б. Вануйта и зювитов II типа свидетельствует о том, что формирование расплавных компонентов происходило в близких фациальных обстановках (Максименко, Шумилова, 2022). Преобладание витрокластов угловатой и аэродинамической формы преимущественно с четкими закаленными очертаниями указывает на то, что основная часть ударного расплава при формировании зювитов перемещалась аэробаллистическим путем и отлагалась в остывшем состоянии, а другая при литификации была еще горячей и пластичной и

отвердевала с образованием ударных стекол неправильной формы, спекшихся с матрицей зювита (Базилевский и др., 1983; Фельдман, 1990; Фельдман, Глазовская, 2018). Установленные характеристики ударных стекол являются надежным критерием типизации и свидетельствуют о принадлежности зювитов р. Б. Вануйта к отложениям аэродинамической фации (Максименко, Шумилова, 2022).

Выявленное сходство составов ударных стекол исследованных зювитов с составом витрокластов зювитов I и II типов указывает на то, что в образовании расплавных компонентов зювитов принимали участие аналогичные типы пород мишени. Полученные данные, с учетом результатов исследований ударных стекол карских зювитов (Максименко и др., 2020), позволяют предполагать, что изученные витрокласты зювитов р. Б. Вануйта образованы преимущественно по алевролитам и глинистой составляющей известняков, что хорошо согласуется с обилием этих пород в составе литокластов анализируемых зювитов.

**Матрикс.** Анализ особенностей матрикса обломочных импактитов при сравнении структурно-вещественных характеристик зювитов является наиболее информативным (Максименко, Исаенко,

2019). По структурно-текстурным характеристикам и распределению химических элементов матрица зювитов р. Б. Вануйта, в целом, имеет сходство с зювитами I и II типов (см. табл. 4). С матриксом зювитов I и II разновидности матрикс пород р. Б. Вануйта сближает интенсивный характер спекания – плохая сохранность кристаллокластов и относительно слабая пористость. При этом буровато-коричневый цвет, преимущественно округлая форма и закрытое состояние пористости, рассредоточенный тонкодисперсный характер распределения кремнезема, глинозема, оксидов магния и железа в матриксе исследованных зювитов аналогичны матриксу зювитов I типа. В то же время локализованное распределение кальция и относительно высокое содержание кристаллокластов кальция близки матрице зювитов II типа.

При этом в отличие от зювитов I типа с весьма плотной однородной низкопористой матрицей матрикс зювитов р. Б. Вануйта содержит большее количество пор, а также большее количество тонкодисперсного кластического материала, имеющего лучшую сохранность микрокластов. В сравнении с зювитами II типа, матрица которых имеет темно-серый цвет, довольно крупные поры и изобилует карбонатным веществом, матрикс изученных зювитов характеризуется буроватым цветом (см. рис. 8), меньшей пористостью, существенно меньшими размерами кристаллокластов и меньшим количеством вещества, в то же время содержит более высокую долю слюдистых минералов и хлорита.

Необходимо отметить, что матрикс зювитов р. Б. Вануйта принципиально отличается от матрикса зювитов III типа по ряду характеристик. Так, матрица зювитов III типа отличается от матрицы изученных пород более высоким содержанием порового пространства (до 15–20 об. %), более крупным размером (до 60 мкм), типом и морфологией пор, которые в матриксе зювитов III типа практически повсеместно открытые, неправильной формы и часто протяженные. Кроме того, минеральные класты в матриксе зювитов III типа, в сравнении с минеральными составляющими матрицы изученных пород, довольно крупные (до 20–30 мкм), относительно хорошо сохранившиеся, имеют четкие обломочные очертания (Максименко, Исаенко, 2019).

При выяснении фациальных обстановок формирования полимиктовых брекчий матрикс и степень его спекания имеет большое значение (Структуры..., 1983; Фельдман, 1990). Важнейшим источником сведений об условиях образования импактитов являются их пороодообразующие минералы (Фельдман, 1990). Для установления температурных условий образования зювитов в качестве маркеров могут использоваться кварц, полевые шпаты, магнетит, циркон, ильменит и другие минералы (Stöffler et al., 2013). Иные минеральные компоненты, присутствующие в зювитовой матрице, та-

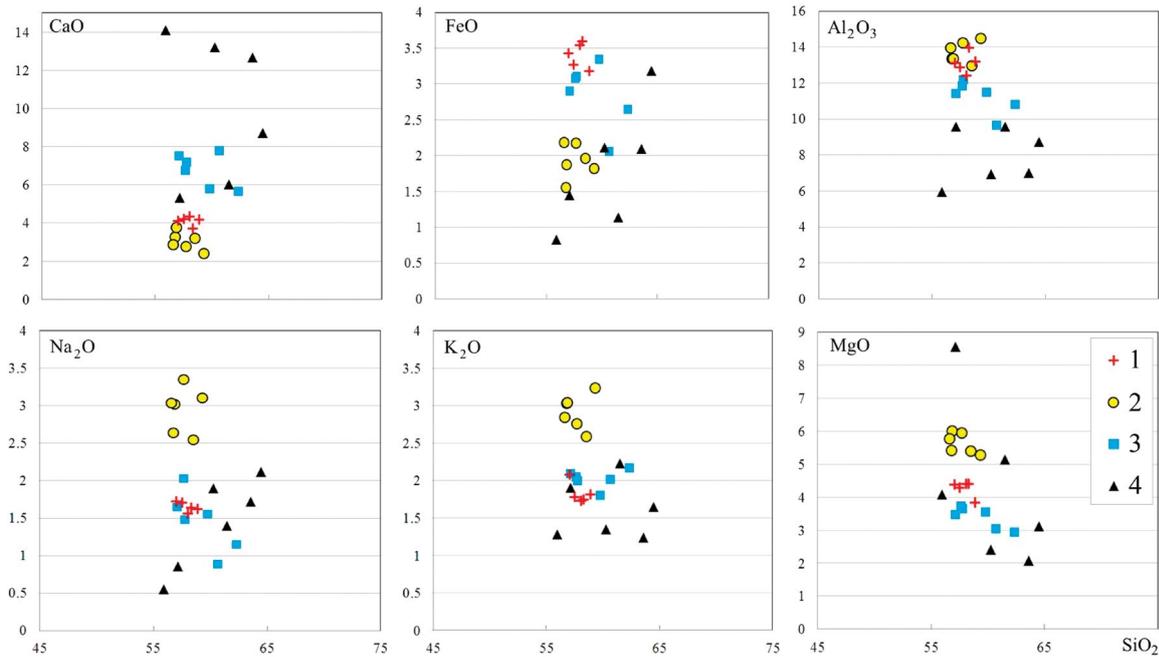
кие как слюды, хлорит, эпидот и др., учитывая пористый характер и интенсивное гидротермальное преобразование пород (Наумов, 1996), скорее всего, имеют вторичную природу и не являются надежными реперами температуры формирования зювитов.

В матриксе зювитов р. Б. Вануйта преобладают кварц и альбит. Кварц обнаружен в виде угловатых и слабоокруглых кластов с четкими очертаниями без признаков спекания. Альбит часто характеризуется плохой сохранностью, присутствует в виде обособлений преимущественно с плохо различимыми очертаниями, между которыми изредка прослеживаются перемычки (“шейки”), указывающие на спекание этих компонентов (Гиршов и др., 2010). Спекание альбитовых зерен и отсутствие такового у зерен кварца свидетельствуют о том, что температура при формировании зювита могла достигать температуры плавления альбита, но не достигала температуры плавления кварца. При этом отсутствие полностью расплавленных альбитовых зерен в матриксе может указывать на относительно кратковременное температурное воздействие. Соответственно, образование зювитов могло происходить при температуре, достигающей  $\approx 1100^\circ\text{C}$  (Navrotsky et al., 1982). В сравнении с установленными параметрами формирования зювитов кратера Рис с температурным интервалом  $\approx 200\text{--}600^\circ\text{C}$  (Stöffler et al., 2013), литификация зювитов р. Б. Вануйта происходила в относительно высокотемпературных условиях.

### Петрохимический состав зювитов

Сравнительный анализ петрохимических особенностей зювитов р. Б. Вануйта с тремя типами зювитов (Максименко и др., 2020) показал, что изученные породы по вещественному составу имеют сходство с зювитами I и II типа (рис. 11). Зювиты р. Б. Вануйта соответствуют зювитами I типа по содержанию кремнезема, глинозема и оксида кальция. Так, содержание  $\text{SiO}_2$  в изученных зювитах, в среднем, составляет 57.94 мас. %, а в зювитах I типа – 57.64 мас. %. Содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{CaO}$  в зювитах р. Б. Вануйта в среднем равны 13.09 и 4.11%, что близко среднему количеству этих компонентов в зювитах I типа (Максименко и др., 2020) – 13.71 мас. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 3.04 мас. %  $\text{CaO}$  (см. табл. 1). Выявленное сходство хорошо отражается на вариационных диаграммах практически полным наложением полей фигуративных точек изученных пород и зювитов I типа по указанным компонентам (см. рис. 11).

По концентрации оксидов щелочей изученные породы аналогичны зювитами II типа – средние содержания  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  в зювитах р. Б. Вануйта составляют 1.65 и 1.83 мас. %, а в зювитах II типа (Максименко и др., 2020) – 1.45 и 2.02 мас. % соответственно (см. табл. 1). Изученные породы име-



**Рис. 11.** Вариационные диаграммы вещественного состава зювитов Карской астроблемы по основным петрохимическим компонентам (силикатные анализы), мас. %.

Зювиты: 1 – р. Б. Вануйта, 2 – I типа, 3 – II типа, 4 – III типа.

**Fig. 11.** Variation diagrams of chemical composition of the suevites of the Kara astrobleme by main petrochemical components (silicate analyses), wt %.

Suevites: 1 – of the B. Vanuyta river, 2 – of the I type, 3 – of the II type, 4 – of the III type.

ют перекрытие полей фигуративных точек по содержанию оксидов железа и магния со второй разновидностью зювитов, однако в целом можно отметить, что в зювитах р. Б. Вануйта концентрация этих компонентов несколько выше, чем в зювитах II типа (см. рис. 11). В анализируемых породах содержание FeO в среднем составляет 3.4 мас. %, MgO – 4.26 мас. %, а в зювитах II типа установлены средние содержания FeO и MgO 2.85 и 3.39 мас. % соответственно.

Выявленная близость вещественного состава исследованных пород с зювитами I и II типа свидетельствует о сходстве их протопород. С учетом полученных данных по петрографическому изучению зювитов, можно заключить, что преобладающим протолитом зювитов р. Б. Вануйта являлись алевролиты и в меньшей степени известняки (Максименко и др., 2020).

Таким образом, установленное преобладание алевролитов среди литокластов зювитов, близость состава этого типа кластов и соответствующих неизмененных пород подтверждают их генетическую связь. Сходство составов литокластов зювитов р. Б. Вануйта и зювитов I типа, близость вещественного состава этих зювитов свидетельствуют о том, что они были образованы по аналогичным типам

протопород. С учетом результатов исследования зювитов Карской астроблемы (Максименко и др., 2020) можно заключить, что преобладающим протолитом зювитов р. Б. Вануйта являлись алевролиты.

Выявленное сходство зювитов р. Б. Вануйта и зювитов I типа по составу также указывает на близость их протопород и может быть связано с их территориальным расположением в области распространения нижнепермских песчаников и алевролитов (Шишкин и др., 2012), а различия в структурно-текстурных особенностях – разными обстановками их формирования (Максименко, Шумилова, 2022). Установленная близость зювитов р. Б. Вануйта и зювитов II типа по структурно-текстурным характеристикам, судя по всему, связана с фациальной общностью этих пород (Максименко, Шумилова, 2022), а различия состава – со спецификой разреза пород мишени, затронутых при формировании кратера в конкретных секторах. Таким образом, из полученных данных следует, что зювиты р. Б. Вануйта на данном этапе исследований могут быть отнесены к переходной разновидности между I и II типом. Выявленные особенности подтверждают, что ведущим фактором типизации зювитов Карской астроблемы является вещественный состав, в то же время типы могут подраз-

деляться более подробно исходя из специфики фациальных обстановок образования.

Установленные особенности морфологии и характера очертаний витрокластов свидетельствуют о том, что преобладающая часть расплавных компонентов при формировании зювитов отлагалась аэробаллистическим путем преимущественно в остывшем состоянии, а другая в момент литификации была еще горячей и пластичной (Базилевский и др., 1983; Фельдман, 1990; Фельдман, Глазковская, 2018). Обнаруженные в кварце литокластов зювитов планарные деформационные элементы по (Stöffler, Grieve, 2007), указывают на умеренную ударную нагрузку с давлением 20–35 ГПа и постимпактной температурой 170–300°C. В то же время, выявленное спекание альбитовых зерен в матриксе указывает на то, что температура литификации зювитов р. Б. Вануйта могла кратковременно достигать  $\approx 1100^\circ\text{C}$ . Из этого следует, что зювиты р. Б. Вануйта представляют собой породы аэродинамической фации, сформированные в относительно высокотемпературных условиях. Подобные условия могут соответствовать нижней части взрывного облака, при литификации материала которой высокие температуры могли сохраняться достаточно долго. Соответственно, зювиты р. Б. Вануйта в структурном плане могут занимать нижнюю часть разреза толщи обломочных импактитов аэродинамической фации (Максименко, Шумилова, 2022).

## ВЫВОДЫ

На основе комплексных исследований впервые установлены петрологические и петрохимические особенности зювитов р. Б. Вануйта. Выявлено, что зювиты весьма разнообразны по содержанию, размеру и количеству расплавных и обломочных компонентов. Матрикс зювитов характеризуется интенсивно спекшимся характером, минеральные компоненты матрицы представлены полевыми шпатами, кварцем, кальцитом, хлоритом, мусковитом, глауконитом, титанитом. Литокласты включают в себя алевролиты, песчаники, известняки, аргиллиты и сланцы. Витрокласты характеризуются обломочной и неправильной морфологией с различным характером границ, пятнистыми, флюидальными и пористыми текстурами.

Выявлено, что зювиты р. Б. Вануйта по характеристикам составных компонентов в определенной степени имеют сходство с зювитами I, и II типа, и на данном этапе исследований могут относиться к переходной разновидности между I и II типами. Наблюдающиеся отличия исследованных пород от указанных типов зювитов могут быть связаны с разными особенностями обстановок их формирования и отчасти, возможно, локальной спецификой мишени. Выявленные особенности подтверж-

дают, что ведущим фактором типизации зювитов Карской астроблемы является вещественный состав, в то же время типы могут подразделяться далее исходя из специфики фациальных обстановок образования.

Установленное преобладание алевролитов среди литокластов зювитов р. Б. Вануйта, близость состава этих кластов и соответствующих неизмененных пород подтверждают их генетическую связь и ведущую роль данного типа пород мишени в образовании исследованных зювитов. Близость состава витрокластов исследованных пород и зювитов I и II типов свидетельствует о том, что образование расплавных компонентов зювитов р. Б. Вануйта происходило по соответствующим протолитам – алевролитам и глинистой составляющей известняков.

По выявленной специфике матрикса определено, что температура литификации зювитов р. Б. Вануйта могла достигать  $\approx 1100^\circ\text{C}$ . Особенности морфологии и характер очертаний витрокластов свидетельствуют, что расплавные компоненты зювитов образовались преимущественно аэробаллистическим путем и отлагались главным образом в остывшем состоянии. Комплекс полученных данных указывает на то, что зювиты р. Б. Вануйта представляют собой породы аэродинамической фации, сформировавшиеся из нижней части взрывного облака и в структурном плане занимают нижнюю часть разреза толщи обломочных импактитов аэродинамической фации.

Результаты исследований могут быть использованы при изучении фаций импактитов и анализе геологического строения других крупных импактных структур, в том числе погребенных, что имеет значение для прогноза и оценки полезных ископаемых в подобных геологических объектах и является важным для лучшего понимания импактитогенеза в целом.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность Н.С. Ковальчук за предоставленные шлифы и аналитический материал по породам мишени Карской астроблемы, О.В. Кокшаровой и Е.М. Тропникову – за проведение аналитических работ, а также рецензентам – за важные замечания и рекомендации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базилевский А.Т., Грановский Л.В., Иванов Б.А., Фельдман В.И., Флоренский К.П., Яковлев О.И. (1983) Ударные кратеры на Луне и планетах. М.: Наука, 232 с.
- Вишневский С.А. (1992) Зювиты Попигаической астроблемы: некоторые парадоксы и мнимо-вторичные взаимоотношения. Новосибирск, СО РАН НИЦ ОИГТМ, 53 с.
- Вишневский С.А. (2013) Попигаическая астроблема – уникальный объект изучения и использования

- (специфика больших импактных событий, общепознавательное значение, экономический потенциал). *Уральский геол. журн.*, **3**(93), 23-45.
- Геологический словарь. (Гл. ред. О.В. Петров) (2010) СПб.: ВСЕГЕИ. Т.1, А-Й, 432 с.
- Гиршов В.Л., Котов С.А., Цеменко В.Н. (2010) Современные технологии в порошковой металлургии. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 385 с.
- Ковальчук Н.С., Шумилова Т.Г. (2020) Минералого-геохимические особенности черных сланцев окружения Карской астроблемы (Пай-Хой). *Литосфера*, **20**(2), 168-183. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-2-168-183>
- Максименко Н.И., Исаенко С.И. (2019) Структурно-текстурные особенности и фазовый состав матрикса разновидностей зювитов Карской астроблемы. *Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России*. Материалы XVII Геологического съезда Республики Коми. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, Т.III, 206-207.
- Максименко Н.И., Шумилова Т.Г., Ковальчук Н.С. (2020) Петрологическая характеристика разновидностей зювитов Карской астроблемы (Пай-Хой, Россия). *Петрология*, **28**(6), 628-649. <https://doi.org/10.31857/S0869590320050039>
- Максименко Н.И., Шумилова Т.Г. (2022) Критерии фациального деления зювитов (на примере зювитов Карской астроблемы). *Международ. науч.-исслед. журн.*, **10**(124). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.69>
- Масайтис В.Л., Данилин А.Н., Машак М.С., Райхлин А.И., Селивановская Т.В., Шадаев Е.М. (1980) Геология астроблем. Л.: Недра, 231 с.
- Масайтис В.Л., Машак М.С., Райхлин А.И., Селивановская Т.В., Шафрановский Г.И. (1998) Алмазоносные импактиты Попигаийской астроблемы. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 179 с.
- Машак М.С. (1990а) Геологическая обстановка времени образования импактных кратеров на Пай-Хое. *Импактные кратеры на рубеже мезозоя и кайнозоя*. Л.: Наука, 24-37.
- Машак М.С. (1990б) Морфология и структура Карской и Усть-Карской астроблем. *Импактные кратеры на рубеже мезозоя и кайнозоя*. Л.: Наука, 37-55.
- Машак М.С., Селивановская Т.В., Масайтис В.Л. (1983) Особенности строения зювитов и аллогенных брекчий Карской астроблемы и динамика распределения в них обломочного материала. *Метеоритика*, **42**, 149-157.
- Назаров М.А., Бадюков Д.Д., Алексеев А.С., Колесников Е.М., Кашкаров Л.Л., Барсукова Л.Д., Супонева И.В., Колесов Г.М. (1993) Карская ударная структура и ее связь с мел-палеогеновым событием. *Бюл. МОИП. Отд. Геол.*, **68**(3), 13-32.
- Наумов М.В. (1996) Основные закономерности постимпактного гидротермального процесса. *Астрономич. вестн.*, **30**(1), 25-32.
- Сазонова Л.В. (1984) Петрография импактитов астроблемы Янисьярви. Дисс. .... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 271 с.
- Селивановская Т.В., Машак М.С., Масайтис В.Л. (1990) Импактные брекчии и импактиты Карской и Усть-Карской астроблем. *Импактные кратеры на рубеже мезозоя и кайнозоя*. Л.: Наука, 55-96.
- Структуры и текстуры взрывных брекчий и импактитов. (1983) Л., 159 с. (Тр. ВСЕГЕИ, Т. 316).
- Фельдман В.И. (1990) Петрология импактитов. М.: Изд-во МГУ, 299 с.
- Фельдман В.И., Глазовская Л.И. (2018) Импактитогенез. М.: КДУ, 151 с.
- Фельдман В.И., Грановский Л.Б., Сазонова Л.В., Коротаева Н.Н., Наумова И.Г. (Ред. А.А. Маракушев) (1981) Импактиты. М.: Изд-во МГУ, 240 с.
- Шишкин М.А., Шкарубо С.И., Молчанова Е.В., Маркина Н.В., Ванштейн Б.Г., Зинченко А.Г., Зуйкова О.Н., Калаус С.В., Козлов С.А., Костин Д.А., Котляр Г.В., Парамонова М.С., Певзнер В.С., Попов М.Я., Пухонто С.К., Савенкова Г.Б., Солонина С.Ф., Чудакова Д.В., Шипилов Э.В., Яковлева Т.В. (2012) Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1 : 1 000 000 (третье поколение). Сер. Южно-Карская. Лист R-41. Амдерма. Объяснит. записка. СПб.: Картограф. фабрика ВСЕГЕИ, 383 с.
- Шумилова Т.Г., Исаенко С.И., Ковальчук Н.С., Уляшев В.В., Макеев Б.А. (2016) Разновидности импактитов, апоугольных алмазов и сопутствующих углеродных фаз Карской астроблемы. *Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2016)*. Материалы минералог. семинара с междунар. участием. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 270-271.
- Шумилова Т. Г., Ковальчук Н. С., Макеев Б. А. (2019) Геохимическая специфика алмазоносных зювитов Карской астроблемы (Пай-Хой). *Докл. АН*, **486**(2), 233-236. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524862233-236>
- Юдин В.В. (1994) Орогенез севера Урала и Пай-Хоя. Екатеринбург: Наука, 283 с.
- Fel'dman V.I., Sazonova L.V., Granovskiy L.B. (1983) A classification of impactites based on petrographic and geological features *Int. Geol. Rev.*, **25**:11, 1246-1254, <https://doi.org/10.1080/00206818309466826>
- Gottwald M., Kenkmann T., Reimoldt U.W. (2020) Terrestrial impact structures: The TanDEM-X Atlas. Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München, Vol. 1, 2. 608 p.
- Grieve R.A.F. (2005) Economic natural resource deposits at terrestrial impact structures. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, **248**(1), 1-29. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2005.248.01.01>
- Grieve R.A.F. (2013) Economic deposits at terrestrial impact structures Impact cratering: Processes and products. (Eds G.R. Osinski, E. Pierazzo). Oxford, UK: Wiley-Blackwell, 177-194. <https://doi.org/10.1002/9781118447307>
- Grieve R.A.F., Masaitis V.L. (1994) The economic potential of terrestrial impact craters *Int. Geol. Rev.*, **36**, 105-151. <https://doi.org/10.1080/00206819409465452>
- Kenkmann T. (2021) The terrestrial impact crater record: A statistical analysis of morphologies, structures, ages, lithologies, and more. *Meteor. Planet. Sci.*, **56**(5), 1024-1070.
- Kenkmann T., Poelchau M.H., Wulf G. (2014) Structural geology of impact craters. *J. Struct. Geol.*, **62**, 156-182. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.01.015>
- King Jr.D.T., Neathery T.L., Petruny L.W. (1999) Impactite Facies Within the Wetumpka Impact-Crater Fill, Alabama. Abstracts of the 30th Lunar and Planetary Sci. Conf., 1634.
- Koeberl C., Sharpton V.L., Murali A.V., Burke K. (1990) Kara and Ust-Kara impact structures (USSR) and their relevance to the K/T boundary event. *Geology*, **18**, 50-53.

- [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)018<0050:KAUKIS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)018<0050:KAUKIS>2.3.CO;2)
- Masaitis V.L., Petrov O.V., Naumov M.V. (2018) Impact lithologies – a key for reconstruction of rock-forming processes and a geological model of the Popigai crater, northern Siberia. *Austral. J. Earth Sci.*, **66**(5), 1-14. <https://doi.org/10.1080/08120099.2018.1509372>
- Meyer C. (2012) Sedimentological, structural and geochemical investigations of the suevite of the impact crater Nördlinger Ries, Germany. PhD thesis, Free University, Berlin, Germany, 130 p.
- Navrotsky A., Capobianco C., Stebbins J. (1982) Some thermodynamic and experimental constraints on the melting of albite at atmospheric and high pressure. *J. Geol.*, **90**, 679-698. <https://doi.org/10.1086/628724>
- Nazarov M.A., Badjukov D.D., Alekseev A.S. (1989) Morphology of the Kara and Ust-Kara impact craters, USSR. *Lunar Planet. Sci.* XX, 762-763.
- Osinski G.R., Grieve R.A.F., Collins G.S., Marion C., Sylvester P. (2008) The effect of target lithology on the products of impact melting. *Meteorit. Planet. Sci.*, **43**(12), 1939-1954. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2008.tb00654.x>
- Osinski G.R., Grieve R.A.F., Spray J.G. (2004) The nature of the groundmass of surficial suevite from the Ries impact structure, Germany, and constraints on its origin. *Meteor. Planet. Sci.*, **39**(10), 1655-1683. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb00065.x>
- Popigai impact structure and its diamond-bearing rocks. (Ed. V.L. Masaitis). (2019) Impact studies, Springer: Cham, 205 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77988-1>
- Reimold U.W., Koeberl C. (2014) Impact structures in Africa: A review. *J. Afr. Earth Sci.*, **93**, 57-175. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.01.008>
- Schmieder M., Kring D.A. (2020) Earth's Impact Events Through Geologic Time: A List of Recommended Ages for Terrestrial Impact Structures and Deposits. *Astrobiology*, **20**(1), 91-141. <https://doi.org/10.1089/ast.2019.2085>
- Sergienko E.S., Yanson S.Yu., Kosterov A., Khariton-skii P.V., Frolov A.M. (2021) Suevites and Tagamites of Zhamanshin Astrobleme: Distribution in the Crater and Petrographic Features. *IOP Conf. Ser.: Earth Environm. Sci.*, **666**, 042080. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/4/042080>
- Shumilova T., Maximenko N., Zubov A., Kovalchuk N., Ulyashev V., Kis V. (2019) Varieties of Impactites and Impact Diamonds of the Kara Meteorite Crater (Pay-Khoy, Russia). *IOP Conf. Ser.: Earth Environm. Sci.*, **362**, 012043. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/362/1/012043>
- Stöffler D., Artemieva N.A., Wünnemann K., Reimold U.W., Jacob J., Hansen K.B., Summerson I.A.T. (2013) Ries crater and suevite revisited – Observations and modeling Pt I: Observations. *Meteorit. Planet. Sci.*, **48**(4), 515-589. <https://doi.org/10.1111/maps.12086>
- Stöffler D., Grieve R.A.F. (2007) Impactites, Ch. 2.11. *Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms, Recommendation of the International Union of Geological Sciences*. (Eds D. Fettes, J. Desmons). Cambridge University Press, Cambridge, UK, 82-92.
- Stöffler D., Hamann C., Metzler K. (2018) Shock metamorphism of planetary silicate rocks and sediments: Proposal for an updated classification system. *Meteorit. Planet. Sci.*, **53**, 5-49. <https://doi.org/10.1111/maps.12912>
- Stöffler D., Knöll H.D., Maerz U. (1979) Terrestrial and lunar impact breccias and the classification of lunar highland rocks. *Proceedings of the 10th Lunar and Planetary Sci. Conf.*, 639-675.
- Trieloff M., Deutsch A., Jessberger E.K. (1998) The age of the Kara impact structure, Russia. *Meteorit. Planet. Sci.*, **33**, 361-372. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1998.tb01640.x>
- Zubov A.A., Shumilova T.G., Zhuravlev A.V., Isaenko S.I. (2021) X-ray computed microtomography of diamondiferous impact suevitic breccia and clast-poor melt rock from the Kara astrobleme (Pay-Khoy, Russia). *Amer. Mineral.*, **106**, 1860-1870. <https://doi.org/10.2138/am-2021-7578>

## REFERENCES

- Bazilevskii A.T., Granovskii L.V., Ivanov B.A., Fel'dman V.I., Florenskii K.P., Yakovlev O.I. (1983) Impact craters on the Moon and planets. Moscow, Nauka Publ., 232 p. (In Russ.)
- Fel'dman V.I. (1990) Petrology of impactites. Moscow, Moscow Stat. Univ. Publ., 299 p. (In Russ.)
- Fel'dman V.I., Glazovskaya L.I. (2018) Impactogenesis. Moscow, KDU Publ., 151 p. (In Russ.)
- Fel'dman V.I., Granovskii L.B., Sazonova L.V., Korotava N.N., Naumova I.G. (1981) Impactites. Moscow, Moscow Stat. Univ. Publ., 240 p. (In Russ.)
- Fel'dman V.I., Sazonova L.V., Granovskii L.B. (1983) A classification of impactites based on petrographic and geological features. *Int. Geol. Rev.*, **25**:11, 1246-1254. <https://doi.org/10.1080/00206818309466826>
- Geological Dictionary. (Ed. Petrov O.V.) (2010) St.Petersburg, VSEGEI Publ. V.I, A-I, 432 p. (In Russ.)
- Girshov V.L., Kotov S.A., Tsemenko V.N. (2010) Modern technology in powder metallurgy. St.Petersburg, Politekhn. Un-t, 385 p. (In Russ.)
- Gottwald M., Kenkmann T., Reimoldt U.W. (2020) Terrestrial impact structures: The TanDEM-X Atlas. Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München. Vol. 1 and 2, 608 p.
- Grieve R.A.F. (2005) Economic natural resource deposits at terrestrial impact structures. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, **248**(1), 1-29. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2005.248.01.01>
- Grieve R.A.F. (2013) Economic deposits at terrestrial impact structures. *Impact cratering: Processes and products*. (Eds G.R. Osinski, E. Pierazzo). Oxford, UK: Wiley-Blackwell, 177-194. <https://doi.org/10.1002/9781118447307>
- Grieve R.A.F., Masaitis V.L. (1994) The economic potential of terrestrial impact craters. *Int. Geol. Rev.*, **36**, 105-151. <https://doi.org/10.1080/00206819409465452>
- Kenkmann T. (2021) The terrestrial impact crater record: A statistical analysis of morphologies, structures, ages, lithologies, and more. *Meteorit. Planet. Sci.*, **56**(5), 1024-1070. <https://doi.org/10.1111/maps.13657>
- Kenkmann T., Poelchau M.H., Wulf G. (2014) Structural geology of impact craters. *J. Struct. Geol.*, **62**, 156-182. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.01.015>
- King Jr.D.T., Neathery T.L., Petruny L.W. (1999) Impactite Facies Within the Wetumpka Impact-Crater Fill, Alabama. *Abstracts of the 30th Lunar and Planetary Sci. Conf.*, 1634.
- Koeberl C., Sharpton V.L., Murali A.V., Burke K. (1990) Kara and Ust-Kara impact structures (USSR) and their rel-

- evance to the K/T boundary event. *Geology*, **18**, 50-53. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)018<0050:KAUKIS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)018<0050:KAUKIS>2.3.CO;2)
- Koval'chuk N.S., Shumilova T.G. (2020) Mineralogical and geochemical features of the black shales surrounding the Kara Astrobleme (Pay-Khoy). *Lithosphere (Russia)*, **20**(2), 168-183. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-2-168-183>
- Maksimenko N.I., Isaenko S.I. (2019) Structural and textural features and phase composition of the matrix of suevite varieties in the Kara astrobleme. *Geology and Mineral Resources of the European North-East of Russia*. Materials of the XVII Geological Congress of Komi Republic. Syktyvkar, IG KSC UB RAS, V. III, 206-207. (In Russ.)
- Maksimenko N.I., Shumilova T.G. (2022) Criteria for fascies division of Suevites on the example of Suevites of the Kara Astrobleme. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.69>
- Maksimenko N.I., Shumilova T.G., Kovalchuk N.S. (2020) Petrological Characteristics of Suevite Varieties in the Kara Astrobleme, Pay-Khoy, Russia. *Petrology*, **28**(6), 549-568, (translated from *Petrologiya*, **28**(6), 628-649). <https://doi.org/10.1134/S0869591120050033>
- Masaitis V.L., Danilin A.N., Mashchak M.S., Raikhlin A.I., Selivanovskaya T.V., Shadenkov E.M. (1980) The geology of astroblems. Leningrad, Nedra Publ., 231 p. (In Russ.)
- Masaitis V.L., Mashchak M.S., Raikhlin A.I., Selivanovskaya T.V., Shafranovskii G.I. (1998) Diamond-bearing impactites of the Popigian astrobleme. St.Petersburg, VSEGEI Publ., 179 p. (In Russ.)
- Masaitis V.L., Petrov O.V., Naumov M.V. (2018) Impact lithologies – a key for reconstruction of rock-forming processes and a geological model of the Popigai crater, northern Siberia. *Austral. J. Earth Sci.*, **66**(5), 1-14. <https://doi.org/10.1080/08120099.2018.1509372>
- Mashchak M.S. (1990a) Geological setting of the time of impact craters generation on Pai-Khoi. *The impact craters at the turn of the Mesozoic and Cenozoic*. Leningrad, Nauka Publ., 24-37. (In Russ.)
- Mashchak M.S. (1990b) Morphology and structure of the Kara and Ust'-Kara astrobleme. *The impact craters at the turn of the Mesozoic and Cenozoic*. Leningrad, Nauka Publ., 37-55. (In Russ.)
- Mashchak M.S., Selivanovskaya T.V., Masaitis V.L. (1983) Fiture of the structure of suevites and allogenic breccias of the Kara astrobleme and the dynamics of the distribution of clastic material in them. *Meteoritika*, **42**, 149-157. (In Russ.)
- Meyer C. (2012) Sedimentological, structural and geochemical investigations of the suevite of the impact crater Nördlinger Ries, Germany. PhD thesis, Free University, Berlin, Germany, 130 p.
- Naumov M.V. (1996) Osnovnye zakonomernosti postimpaktnogo gidrotermal'nogo protsesssa. *Astronom. Vestn.*, **30**(1), 25-32. (In Russ.)
- Nazarov M.A., Badjukov D.D., Alekseev A.S. (1989) Morphology of the Kara and Ust-Kara impact craters, USSR. *Lunar Planet. Sci. XX*, 762-763.
- Nazarov M.A., Badyukov D.D., Alekseev A.S., Kolesnikov E.M., Kashkarov L.L., Barsukova L.D., Suponova I.V., Kolesov G.M. (1993) Kara imhact structure and its relatuiontship with the Cretaceous-Paleogene event. *Bull. MOIP, Sec. Geol.*, **68**(3), 13-32. (In Russ.)
- Navrotsky A., Capobianco C., Stebbins J. (1982) Some thermodynamic and experimental constraints on the melting of albite at atmospheric and high pressure. *J. Geol.*, **90**, 679-698. <https://doi.org/10.1086/628724>
- Osinski G.R., Grieve R.A.F., Collins G.S., Marion C., Sylvester P. (2008) The effect of target lithology on the products of impact melting. *Meteorit. Planet. Sci.*, **43**(12), 1939-1954. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2008.tb00654.x>
- Osinski G.R., Grieve R.A.F., Spray J.G. (2004) The nature of the groundmass of surficial suevite from the Ries impact structure, Germany, and constraints on its origin. *Meteorit. Planet. Sci.*, **39**(10), 1655-1683. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb00065.x>
- Popigai impact structure and its diamond-bearing rocks. (Ed. V.L. Masaitis). (2019) Impact studies, Springer: Cham, 205 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77988-1>
- Selivanovskaya T.V., Mashchak M.S., Masaitis V.L., (1990) Impact breccias and impactites of the Kara and Ust'-Kara astroblemes. *Impact craters at the turn of the Mesozoic and Cenozoic*. Leningrad, Nauka Publ., 55-96. (In Russ.)
- Sergienko E.S., Yanson S.Yu., Kosterov A., Kharitonovskii P.V., Frolov A.M. (2021) Suevites and Tagamites of Zhamanshin Astrobleme: Distribution in the Crater and Petrographic Features. *IOP Conf. Ser.: Earth Environm. Sci.*, **666**, 042080. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/4/042080>
- Reimold U.W., Koeberl C. (2014) Impact structures in Africa: A review. *J. Afr. Earth Sci.*, **93**, 57-175. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.01.008>
- Sazonova L.V. (1984) Petrography of impactites of astrobleme Yanis'yarvi: Cand. geol. and min. nauk dis. Mjscow, MGU, 271 p. (In Russ.)
- Shishkin M.A., Shkarubo S.I., Molchalova E.V., Markina N.V., Vanshtein B.G., Zinchenko A.G., Zuikova O.N., Kalau S.V., Kozlov S.A., Kostin D.A., Kotlyar G.V., Paramonova M.S., Pevzner V.S., Popov M.Ya., Pukhonto S.K., Savenkova G.B., Solonina S.F., Chudakova D.V., Shipilov E.V., Yakovleva T.V. (2012) State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1 000 000 (third generation). Series South Kara. Sheet R-41. Amderma. Explanatory letter. St.Petersburg, Kartograf. fabrika VSEGEI Publ., 383 p. (In Russ.)
- Schmieder M., Kring D.A. (2020) Earth's Impact Events Through Geologic Time: A List of Recommended Ages for Terrestrial Impact Structures and Deposits. *Astrobiology*, **20**(1), 91-141. <https://doi.org/10.1089/ast.2019.2085>
- Shumilova T.G., Isaenko S.I., Koval'chuk N.S., Ulyashev V.V., Makeev B.A. (2016) Varieties of impactites, after-coal diamonds and associated carbon phases of the Kara astrobleme. *Modern Problems on Theoretical, Experimental and Applied Mineralogy (Yushkin Readings-2016)*. Proc. Min. Sem. with International Participation. Syktyvkar, IG KSC UB RAS, 270-271. (In Russ.)
- Shumilova T.G., Koval'chuk N.S., Makeev B.A. (2019) Geochemical Features of the Diamondiferous suevites of the Kara Astrobleme (Pay-Khoy). *Dokl. Earth Sci.*, **486**(1), 545-548 (translated from *Dokl. Akad. Nauk*, **486**(2), 233-236). <https://doi.org/10.1134/S1028334X19050167>
- Shumilova T., Maksimenko N., Zubov A., Kovalchuk N., Ulyashev V., Kis V. (2019) Varieties of Impactites and Impact Diamonds of the Kara Meteorite Crater (Pay-Khoy, Russia). *IOP Conf. Ser.: Earth Environm. Sci.*, **362**,

012043. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/362/1/012043>
- Stöffler D., Artemieva N.A., Wünnemann K., Reimold U.W., Jacob J., Hansen K.B., Summerson I.A.T. (2013) Ries crater and suevite revisited – Observations and modeling Part I: Observations. *Meteorit. Planet. Sci.*, **48**(4), 515-589. <https://doi.org/10.1111/maps.12086>
- Stöffler D., Hamann C., Metzler K. (2018) Shock metamorphism of planetary silicate rocks and sediments: Proposal for an updated classification system. *Meteorit. Planet. Sci.*, **53**, 5-49. <https://doi.org/10.1111/maps.12912>
- Stöffler D., Knöll H.D., Maerz U. (1979) Terrestrial and lunar impact breccias and the classification of lunar highland rocks. *Proceedings of the 10th Lunar and Planetary Sci. Conf.*, 639-675.
- Stöffler D., Grieve R.A.F. (2007) Impactites, Ch. 2.11. *Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms, Recommendation of the International Union of Geological Sciences*. (Eds D. Fettes, J. Desmons). Cambridge University Press, Cambridge, UK, 82-92.
- Structures and textures of explosive breccias and impactites. Leningrad, 159 p. (Tr. VSEGEI, V. 316). (In Russ.)
- Trieloff M., Deutsch A., Jessberger E.K. (1998) The age of the Kara impact structure, Russia. *Meteorit. Planet. Sci.*, **33**, 361-372. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1998.tb01640.x>
- Vishnevskii S.A. (1992) Suevites of Popigai astrobleme: some paradoxes and imaginary-secondary relationships. Novosibirsk, SO RAN NITs OIGGM, 53 p. (In Russ.)
- Vishnevskii S.A. (2013) Popigai astrobleme – unique object of study and use (the specifics of large impact events the general cognitive significance of the economic potential) *Ural'skii Geol. Zhurnal*, **3**(93), 23-45. (In Russ.)
- Yudin V.V. (1994) Orogenez of the north Urals and Pay-Khoy. Ekaterinburg, Nauka, 283 p. (In Russ.)
- Zubov A.A., Shumilova T.G., Zhuravlev A.V., Isaenko S.I. (2021) X-ray computed microtomography of diamondiferous impact suevitic breccia and clast-poor melt rock from the Kara astrobleme (Pay-Khoy, Russia). *Amer. Mineral.*, **106**, 1860-1870. <https://doi.org/10.2138/am-2021-7578>