

## Получение искусственных аналогов импактных стекол астроблемы Жаманшин методом высокотемпературной плавки\*

Е. С. Сергиенко<sup>1</sup>, С. Ю. Янсон<sup>1</sup>, В. В. Карпинский<sup>1,2</sup>,  
И. А. Левицкий<sup>3</sup>, Л. Ф. Папко<sup>3</sup>, П. В. Харитонский<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,  
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

<sup>2</sup> Геофизическая служба Российской академии наук,  
Российская Федерация, 249035, Обнинск, пр. Ленина, 189

<sup>3</sup> Белорусский государственный технологический университет,  
Беларусь, 220006, Минск, ул. Свердлова, 13А

<sup>4</sup> Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН,  
Российская Федерация, 194064, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

**Для цитирования:** Сергиенко, Е. С., Янсон, С. Ю., Карпинский, В. В., Левицкий, И. А., Папко, Л. Ф., Харитонский, П. В. (2024). Получение искусственных аналогов импактных стекол астроблемы Жаманшин методом высокотемпературной плавки. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 69 (2), 333–355. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.207>

Установление генезиса коптогенных пород и их эволюционирования в течение геологического времени имеет большое значение для построения сценариев импактных событий и изучения петрофизических свойств горных пород в целом. Несмотря на то, что астроблема Жаманшин (Казахстан) изучается уже 85 лет, до сих пор остается много неразрешенных проблем, в том числе и в области моделирования этого импактного события. Искусственные аналоги импактных стекол, различные виды которых широко распространены на Жаманшине, могли бы воспроизводить наиболее характерные черты природных объектов в отношении их состава, морфологии. Получая модельные образцы из шихты различного состава, можно спроецировать их характеристики на импактиты, варьируя условия охлаждения, которые определяют процессы стеклования и кристаллизации. В данном исследовании были получены искусственные аналоги импактных стекол астроблемы Жаманшин путем плавления пород мишени астроблемы. Использовалась газопламенная высокотемпературная печь. Исходная шихта для плавления подготавливалась таким образом, чтобы получить полный расплав в достаточно большом объеме пробы (сопоставимой с объемами некоторых видов природных импактитов Жаманшина — жаманшинитов и иргизитов). Химический и структурно-фазовый состав искусственных стекол исследовался методом рентгенофазового (РФА) и рентгеноспектрального флуоресцентного анализа (РСФА), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и рентгеноспектрального микроанализа (РСМА). Для определения фазовых переходов и химических превращений исходных пород при изменении температуры была проведена дифференциальная сканирующая

---

\* Эксперименты проводились с использованием оборудования Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета (РЦ «Микроскопии и микроанализа», РЦ «Рентгенодифракционные методы исследования», РЦ «Методы анализа состава вещества») и Белорусского государственного технологического университета. Плавление горных пород выполнено по соглашению между Санкт-Петербургским университетом и Белорусским государственным технологическим университетом (С-РЦ 19/3 от 07.08.2021 г.).

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2024

калориметрия. Химический и структурно-фазовый состав полученных стекол сравнивался с характеристиками импактитов Жаманшина и стекол иного генезиса. Искусственные стекла идентичны Жаманшинским импактитам. Предложенная методика получения аналогов импактных стекол показала свою правомерность.

*Ключевые слова:* астроблема Жаманшин, искусственные аналоги импактитов, стекло, высокотемпературное плавление.

## 1. Введение

Интерес к изучению астроблем на сегодняшний день весьма значителен, поскольку известны геологические и биологические следствия ударных событий в эволюции Земли. Экспериментальное моделирование импактных расплавов представляет огромный интерес в связи с важностью проблемы построения сценариев импактных событий и изучения пород астроблем. Методы выявления импактных структур в настоящее время хорошо разработаны. В их основе лежат физическая теория импактного кратерообразования и детальное изучение вещества горных пород, подвергшихся воздействию высоких давлений и температур, превышающих характерные для обычных магматических, метаморфических и тектонических процессов (French and Koeberl, 2010; Osinski and Pierazzo, 2013; Melosh, 1989; Масайтис и др., 1980). Известен набор структурно-геологических, геофизических и петрографо-минералогических признаков импактных структур. Петрохимические и геохимические признаки могут сохраняться при более интенсивном преобразовании, в отличие от структурных и петрографо-минералогических. Поэтому именно они могут служить основой для идентификации импактных пород.

Лабораторное воспроизведение естественных эндогенных процессов, их физико-химическое моделирование является главнейшим направлением современной экспериментальной и технической петрологии (Граменицкий и др., 2000). Особую значимость приобретает здесь контроль параметров физического эксперимента (температуры, давления и др.). При этом всегда остается проблема недостижимости полной аналогии между природными явлениями и их искусственным воспроизведением ни по времени, ни по сложности протекания. Однако эти эксперименты, обладая единой физико-химической основой, помогают понять явления, происходящие на Земле, и имеют значение для фундаментальной науки. Одной из задач является прямое моделирование процессов образования минералов и горных пород путем их искусственного воспроизведения. Решение этой задачи всегда ограничено возможностями применяемого оборудования и технологий. В области моделирования образования импактных пород нужно учитывать два взаимосвязанных фактора импактного воздействия — сверхвысокие давления и температуры. Здесь возможно использование высокотемпературных печей и импульсных установок.

Эксперименты по плавлению горных пород при различных давлениях и температурах описаны в многочисленных публикациях. В статьях коллектива авторов Института геологии и минералогии СО РАН исследуются оптические и плотностные свойства стекол системы  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3(\text{MgO})\text{-CaO}(\text{Na}_2\text{O})$ , полученных плавлением при температурах 1500–1600 °С. Состав их соответствует различным горным породам (Куряева и Сурков, 2012 и ссылки в ней) в предположении возможности

приложения этих исследований при изучении глубинных магм. В работах (Surkov et al., 2007; Surkov and Gartvich, 2012) описаны эксперименты, проводимые при давлении 1.0–2.8 ГПа и температурах 1300–1535 °С с составами пород щелочноземельной серии. Работа направлена на решение проблемы неопределенности характера геологических процессов, которые приводят к разнообразию составов этих пород и их структурно-тектонического положения. Было проведено экспериментальное исследование фазовых взаимоотношений между анортитом, шпинелью, клинопироксеном, корундом и гранатом и установлены особенности плавления для этой ассоциации. Эксперименты по плавлению эклогита при давлениях 5 ГПа и температурах 1200–1300 °С для изучения процессов алмазообразования в кимберлитах описаны в работе (Бутвина и др., 2009). Плавление при высоких давлениях предположительно неизменных кимберлитов является одним из методов, позволяющих реконструировать состав первичных кимберлитовых расплавов и их эволюцию вдоль вероятных P–T профилей подъема. В работе (Шарыгин и др., 2013) представлены результаты плавления неизмененного гипабиссального кимберлита трубки Удачная-Восточная (Сибирская платформа) при давлениях 3.1–6.5 ГПа и температурах 900–1500 °С и построена модель эволюции состава кимберлитового расплава трубки.

Наиболее полной сводкой экспериментов по плавлению магматических пород является База данных ИНФОРЭКС<sup>1</sup>. Она была создана в середине 1990-х годов в Лаборатории термодинамики и математического моделирования природных процессов Института геохимии и аналитической химии им. Вернадского РАН (Арискин и др., 1997). Сейчас в базе данных находится 290 работ, содержащих до 15 000 фазовых составов из 10 500 экспериментов.

Для воспроизведения ударного метаморфизма в лабораторных условиях применяются различные устройства воздействия на минералы и горные породы плоской ударной волной и методики нагружения горных пород сферической сходящейся ударной волной (Козлов и Сазонова, 2012; Osinski and Pierazzo, 2013; French and Short, 1968; Badyukov et al., 2018). Обычные размеры образцов, исследуемых в этих экспериментах, — не более 30–50 мм.

Основная идея данной работы — получить искусственные аналоги импактных стекол в объемах, сопоставимых с размерами природных импактитов, методом высокотемпературного плавления без ударных нагрузок и проверить, воспроизводят ли такие модельные образцы наиболее характерные черты природных объектов в отношении их химического, структурно-фазового состава и морфологии. В качестве исходного материала были выбраны различные по составу породы цокольного комплекса импактного кратера Жаманшин (Казахстан). Это достаточно молодая ( $0.91 \pm 0.14$  млн лет, Schmieder and Kring, 2020) и относительно доступная для изучения астроблема. Коллектив авторов провел там два полевых сезона (2018–2019) и имеет представительную коллекцию как пород мишени, так и импактитов. Этот кратер уникален и интересен тем, что в нем встречены импактные стекла, имеющие широкие вариации составов и структурных особенностей: иргизиты, микроиргизиты, тагамиты, жаманшиниты (бомбы) и зювиты (по классификации Масайтис, 1983; Stöffler and Grieve, 2007). Иргизиты — лапилли стекла от 1–2 мм

---

<sup>1</sup> Доступно на: <https://comagmat.web.ru/apps-infoex.html>. [Дата доступа 01.09.2022].



Рис. 1. Иргизиты (а, б), микроиргизиты (в, з), жаманшиниты (д-з), тагамиты (и, к) и зювиты (л, м) астроблемы Жаманшин

и менее (микроиргизиты) до нескольких сантиметров по длинной оси. Морфология иргизитов очень разнообразна: почти идеальные сфериды (микроиргизиты), каплевидные, гантелеобразные, брызгообразные с характерными поверхностными структурами течения. Нередки и находки иргизитов весьма причудливых форм. Тагамиты — массивные пластообразные тела (на Жаманшине их мощность до 1 м). Их разновидностью являются жаманшиниты (бомбы и их обломки), достигающие размеров до десятков сантиметров (рис. 1).

Для создания искусственных стекол использовалась высокотемпературная печь; исходная шихта для плавления подготавливалась таким образом, чтобы получить полный расплав в объеме пробы, сопоставимой с объемами некоторых видов природных импактитов Жаманшина (иргизитов и жаманшинитов). В ходе эксперимента варьировались состав исходной шихты и условия охлаждения, которые определяют процессы стеклования и кристаллизации.

Полученные результаты сравнивались с литературными данными о составах некоторых видов технических стекол, природных стекол не импактного генезиса и тектитов. Также характеристики искусственных стекол сравнивались по структурно-фазовому и химическому составу с природными импактными расплавами Жаманшина. Показателем валидности предлагаемого метода получения аналогов импактных стекол и оптимальности параметров эксперимента являлось наибольшее соответствие искусственных стекол природным Жаманшинским.

## 2. Методы и образцы

### 2.1. Методы исследования

Эксперименты для анализа химического и структурно-фазового состава образцов проводились на оборудовании Научного парка СПбГУ. Для определения качественного и количественного элементного состава применялся рентгеноспектральный флуоресцентный анализ (РСФА), который был реализован на энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре EDX-800P (Shimadzu, Япония). Рентгенофазовый анализ (РФА) на настольном порошковом дифрактометре Bruker «D2 Phaser» (Bruker, Германия) — для определения минерального состава. Оптическая микроскопия для определения морфологии поверхности образцов и их цветовых особенностей проводилась на стереомикроскопе Leica205 M (Leica, Германия). Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) — на системе со сфокусированными электронным и ионным зондами QUANTA 200 3D (FEI, Нидерланды) с аналитическим комплексом Pegasus 4000 (EDAX, США) и настольном растровом электронном микроскопическом анализаторе TM 3000 (Hitachi, Япония).

Изображения СЭМ получены с полированных и объемных образцов в режимах отраженных и вторичных электронов. Электронно-зондовые микроанализы выполнены на энергодисперсионном дифрактометре в условиях высокого вакуума. Аналитические спектры собраны с полированной поверхности напыленного углеродом образца при ускоряющем напряжении 15 и 20 кВ.

Измерительный блок DSC 404 F3 Pegasus (Netzsch, Германия) (лаборатория стекла и стекловидных материалов Белорусского государственного технологического университета) использовался для идентификации химических реакций, фазовых переходов первого рода, стеклования, фазовых переходов второго рода, происходящих в образцах с изменением температуры. Диапазоны рабочих температур: от комнатной до 1500 °С.

### 2.2. Образцы

Мишень астроблемы Жаманшин имеет сложное геологическое строение (Бойко и др., 2009). Метаморфические сложно дислоцированные породы (сланцы, кварцито-сланцы) силурийского возраста распространены в северной, северо-западной части кратера и сочленяются с толщей вулканогенно-осадочных пород нижнекаменноугольного возраста, распространенной на востоке, юго-востоке по тектоническому разлому с угловым несогласием. Почти повсеместно породы палеозоя перекрыты меловыми и четвертичными отложениями (песками, глинами, алевролитами). Исходным материалом для плавления являлись породы вулканогенно-осадочного комплекса (ВОП, идентификатор **And**) и кварцитовые сланцы (идентификатор **Sha**) Жаманшина. При этом не учитывался естественный факт контаминации природных расплавов метеоритным веществом (Mizera et al., 2012; Jonášová et al., 2016; Větvíčka et al., 2010). Это оправдано тем, что в данной работе оценивается содержание лишь основных элементов. А содержание редких элементов, на которое влияет вещество ударника, в данном контексте можно считать незначимым. Для сравнительного анализа были также получены расплавы



Рис. 2. Приготовленная шихта для плавления (а); газовая пламенная печь — процесс плавки (б); тигли перед извлечением из печи (в)

базальтов Ровенского месторождения Украины (идентификатор **Bas**). Базальтовые породы широко используются в технологических областях получения материалов с заданными характеристиками, для них хорошо известны параметры процессов плавления.

Эксперименты по плавлению пород проводились на кафедре технологии стекла и керамики Белорусского государственного технологического университета (рис. 2).

Образцы пород измельчались на лабораторной щековой дробилке ВВ 50 (Retsch, Германия) до фракций размером: 2–4 мм и < 1 мм. Дробление пород до фракции 2–4 мм обычно применяется в практике лаборатории стекла и керамики БГТУ для получения стекол из горных пород. Нами было опробовано также более тонкое истирание (< 1 мм) для установления зависимости плавления пород от размера фракции. Подготовленные образцы исходной шихты помещались в корундовые тигли емкостью 200 см<sup>3</sup>.

Плавление проб проводилось в газовой пламенной печи с турбулентным движением пламени и принудительной подачей воздуха на горение. Максимально достижимая температура составляла  $1515 \pm 5$  °С. Длительность выдержки образцов в печи (нагрев от комнатной температуры до максимальной) — 7–8 ч. Скорость подъема температуры в печи — 250 °С/ч. Газовая среда окислительная при коэффициенте избытка воздуха 1.08–1.13. Температура контролировалась термопарой, установленной на верхнем уровне тиглей. Регулирование температурного и газового режимов автоматическое. Однородность расплава оценивалась по нити, вытянутой из расплава (проба на нить).

После извлечения из печи расплав немедленно разделялся на порции, каждая из которых остывала в различных условиях (табл. 1).

Таблица 1. Перечень полученных образцов для различных режимов охлаждения

Условия охлаждения	$t$ , с	$v$ , см <sup>3</sup>	Идентификатор условий охлаждения
Погружение в воду	~1	10–25	W
Застывание на чугунной плите	~10 <sup>2</sup>	20–25	P
Остывание в тигле	~10 <sup>3</sup>	50–70	C
Остывание в печи	~10 <sup>5</sup>	50–70	F

Примечание. В таблице обозначены:  $t$  — длительность охлаждения;  $v$  — объем расплава, подвергнувшегося охлаждению.

Таким образом, идентификаторы образцов обозначены аббревиатурами, содержащими информацию о составе исходной шихты и условиях остывания расплава. Например, образец And W получен из вулканогенно-осадочной породы, расплав охлаждался погружением в воду.

### 3. Результаты и обсуждение

#### 3.1. Оценка валидности применяемой методики для получения полного расплава шихты

Анализ химического состава вулканогенно-осадочной породы позволяет установить соотношение стеклообразующих компонентов и модификаторов  $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)/(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ , которое для данного типа породы составляет 2.3–3.6 (для базальтов — 2.6–2.8). Соотношение указанных выше оксидов для кремнистых сланцев составляет 8.4–9.7. Особенности протекания процессов плавления различных горных пород, обусловленных их физико-химическими свойствами, определили получение расплавов, различных по количеству выхода стекла и морфологическим характеристикам (табл. 2 и рис. 3). Для некоторых вариантов состава шихты невозможно было получить образцы всех условий остывания из-за большой вязкости расплава и малого количества финального вещества. Всего было получено 13 образцов.

Проба на нить для всех полученных составов не выявила кристаллических и газообразных включений. При всех режимах в результате охлаждения расплава формируется стекловатая структура. На границе раздела сред расплав / воздух при режимах «медленного» остывания в тигле или печи (образцы с идентификаторами С, F) образуется пленка различных цветов (от сероватого до коричневого), отличающаяся по составу от основного расплава, видимо, повышенной концентрацией оксидов железа.

При плавлении вулканогенно-осадочных пород и базальтов был получен текучий однородный расплав с пониженной вязкостью независимо от размера фракции

Таблица 2. Характеристики полученных расплавов

Порода	R, мм	Характеристика расплава
Базальт (Bas)	> 2	Расплав черного цвета с сильным блеском, однородный, вязкость расплава обеспечивает легкое сливание из тигля
ВОП (And)	> 2	Расплав осветленный, черно-коричневого цвета, вязкий, выливание из тигля не затруднено
	< 1	Расплав черного цвета с сильным блеском, однородный, вязкость расплава обеспечивает легкое сливание из тигля. Поверхностная пленка (корка) отсутствует. Отмечается наличие шихтной пены на стенках тигля
Сланцы (Sha)	> 2	Расплав высоковязкий, выливание из тигля затруднено. На поверхности и внутри остывшего расплава имеются не расплавившиеся фрагменты исходной шихты
	< 1	Расплав черно-коричневого цвета, однородный, без включений нерасплавленного материала

Примечание. В таблице обозначены: R — размер фракции шихты; ВОП — вулканогенно-осадочная порода.

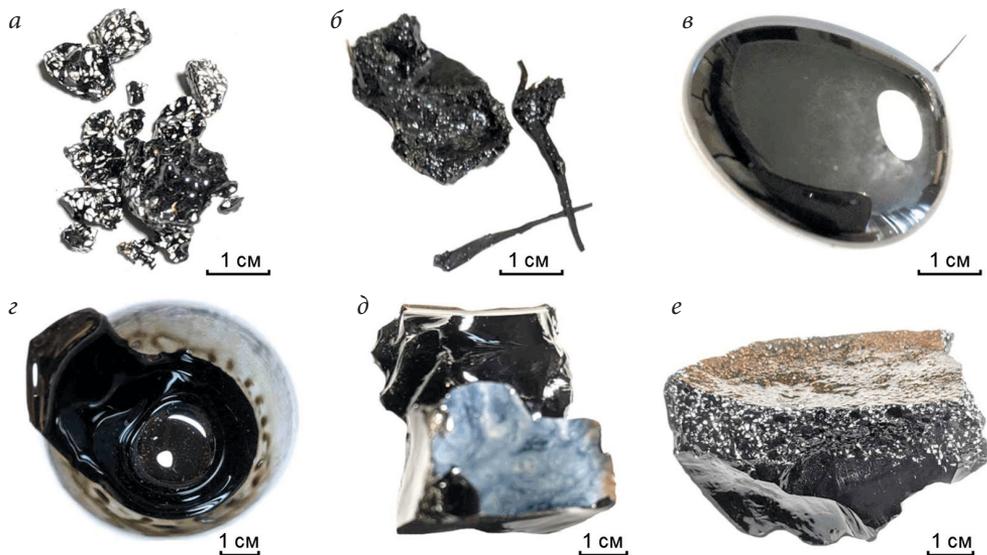


Рис. 3. Примеры полученных расплавов:  
*a* — Sha W; *б* — Bas W; *в* — And P; *г* — And C; *д* — And F; *е* — Sha F

шихты (рис. 3, б–г). На поверхности образцов — пленка голубоватого, желтоватого, серовато-коричневатого цвета. Большой площадью она обладает для длительно остывающих образцов (рис. 3, д–е).

Плавление сланцев крупной фракции (> 2 мм) дает очень вязкую стекловатую массу, которая содержит значительное количество включений не до конца расплавившейся шихты. Быстрое остывание (в воду) приводит к равномерному распределению их по расплаву (рис. 3, а). При остывании в печи полученный образец на сколе демонстрирует значительную дифференциацию: на поверхности образуется корка коричневого цвета, далее следует слой, содержащий включения не до конца расплавившейся шихты, а затем — хорошо остеклованная однородная масса (рис. 3, е). После измельчения сланцевой шихты (фракция < 1 мм) удалось достигнуть полного расплавления. Расплав стал однородным, текучим, менее вязким.

При охлаждении всех расплавов в воде формировались в том числе каплеобразные фрагменты, по форме напоминающие иргизиты (рис. 3, б).

Известно, что плавление проходит в неравновесных условиях. Эта неравновесная система имеет нестационарное температурное поле, в котором каждому элементарному объему соответствует своя собственная неравновесная температура, зависящая от времени. Фазовый переход в элементарных объемах протекает в пределах исходной фазы. Происходит чередование состояний локального термодинамического равновесия/неравновесия. Это длительный многостадийный процесс, который реализуется в интервале температур и начинается в поверхностном слое зерен. То есть в кристаллах имеют место эффекты «предварительного плавления», а в расплавах наблюдается образование кластеров вблизи точки плавления со структурами, которые могут соответствовать ближнему порядку кристаллов, из которых формируется расплав. Происходит уменьшение ориентационного порядка, сопровождающее плавление кристаллов. Особенно это важно

для кристаллов, где существуют сильные связи между атомами, что имеет место в горных породах (Ubbelohde, 1950; Ubbelohde, 1965 и мн. др.).

При нагревании полиминеральной породы непосредственно около каждого зерна минерала образуется расплав, состав которого отвечает химическому составу минерала. За счет диффузии при повышении температуры эти расплавы взаимодействуют между собой. В силикатных системах процесс проходит медленно, поэтому расплав длительное время имеет химическую и структурную неоднородность (зональное строение). Расплав всегда структурно гетерогенен. Он изолирует зерна минералов друг от друга и вследствие этого в единой системе (плавящаяся горная порода) одновременно существует несколько подсистем «кристалл — расплав», число которых зависит от числа минералов, образующих горную породу. Естественно, они плавятся при разных температурах. Плавление щелочного полевого шпата происходит в температурном диапазоне 1000–1160 °С. В интервале 1160–1350 °С наблюдается взаимодействие расплава с зернами плагиоклаза и образование макрогомогенного полевошпатового расплава. При  $T = 1350$  °С расплав начинает реагировать с зернами кварца (Соболев и др., 2020).

Таким образом, тонкоизмельченное вещество из кристаллического (упорядоченного) состояния можно перевести в расплав (неупорядоченное состояние) изменением параметров состояния (давления, температуры, состава) значительно эффективнее. Температуры плавления тонкодиспергированного материала горных пород и минералов ниже температур плавления нераздробленных образцов (Соболев, 2017; Соболев и др., 2020). Это подтверждается и нашими экспериментами — чем мельче фракция шихты, тем однороднее расплав и, по-видимому, ниже температура полного плавления образцов. Для используемого в данном исследовании объема шихты доступные максимальные температуры позволили получить полный расплав за счет подбора размера фракции расплавляемого материала ( $< 1$  мм).

Термический анализ исходных материалов (вулканогенно-осадочной породы и сланцев, размер фракции  $< 1$  мм) проводился методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с использованием измерительного блока DSC 404 F3 Pegasus фирмы Netzsch (Германия) в интервале температур 20–1400 °С в режиме нагрева (рис. 4). Скорость нагрева составляла 10 °С/мин. ДСК позволила выявить и исследовать фазовые превращения и химические реакции, протекающие в них при нагревании по термическим эффектам, сопровождающим эти изменения.

Анализируя кривые ДСК вулканогенно-осадочной породы (рис. 4, а), установлено наличие термического эффекта с максимумом при 267.0 °С, обусловленного потерей адсорбционной и межслоевой молекулярной воды, присутствующей в минералах породы. Экзотермический эффект небольшой интенсивности при 350.9 °С вызван окислением железа, присутствующего в небольшом количестве в хлорите и других минералах, он может налагаться на процесс рекристаллизации мусковита с упорядочением деформированной кристаллической решетки в местах ее разрывов и смещений (Иванова и др., 1974). При 574.5 °С эндотермический эффект связан, по нашему мнению, с наложением процессов выделения конституционной воды из хлорита и эндотермического эффекта обратимого полиморфного превращения  $\alpha$ -кварца в  $\beta$ -кварц. Ступенчатость выделения конституционной воды из хлорита может давать своеобразный характер максимума этого эндоэффекта. Глубокий эндотермический эффект, соответствующий температуре 756.7 °С,

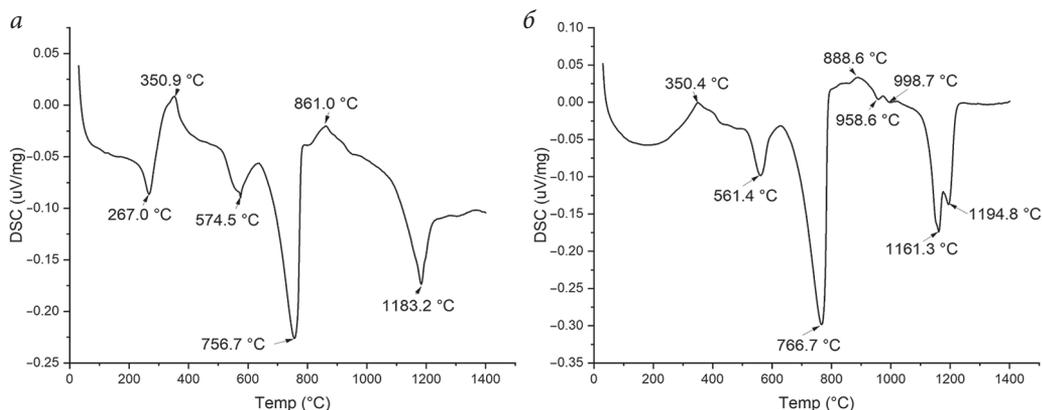


Рис. 4. Кривая ДСК вулканогенно-осадочной породы (а) и сланца кристаллического (б) в режиме нагрева

обусловлен дегидратацией и перестройкой кристаллической решетки мусковита, присутствующего в породе. Экзотермический эффект малой интенсивности при 861.0  $^{\circ}\text{C}$  протекает в узком температурном интервале и объясняется образованием минерала форстерита (Иванова и др., 1974). Последующий эндотермический эффект при 1183.2  $^{\circ}\text{C}$  может быть также наложением ряда эффектов, вызванных распадом кристаллической решетки мусковита, разрушением структуры эпидота с одновременным удалением группы  $\text{OH-}$  и образованием из продуктов распада других минералов, а также плавлением плагноклазов.

Кристаллическому сланцу характерен первый экзотермический эффект с максимумом при 350.4  $^{\circ}\text{C}$ , аналогичным описанному для вулканогенно-осадочной породы при 350.9  $^{\circ}\text{C}$  (рис. 4, б). Эндотермический эффект при 561.4  $^{\circ}\text{C}$  вызван наложением процесса выделения конституционной воды из хлорита, а также полиморфным превращением  $\alpha$ -кварца в  $\beta$ -кварц. Повышение содержания хлорита приводит к некоторому изменению характера кривой данного максимума и смещению его в сторону более низких температур по сравнению с вулканогенно-осадочной породой. Эндоэффект значительной интенсивности при 766.7  $^{\circ}\text{C}$  обусловлен, аналогично вулканогенно-осадочной породе, дегидратацией и перестройкой кристаллической решетки мусковита. Экзотермический эффект малой интенсивности с максимумом при 888.6  $^{\circ}\text{C}$  вызван, очевидно, образованием минералов оливинной структуры (Иванова и др., 1974). При 958.6 и 998.7  $^{\circ}\text{C}$  для сланцев наблюдаются эндотермические эффекты малой интенсивности, которые отвечают соответственно разложению примесного кальцита с образованием  $\text{CaO}$  и разрушением структуры эпидота при одновременном удалении гидроксильной группы. Глубокий эндотермический эффект с максимумом при 1161.3  $^{\circ}\text{C}$  может быть связан с распадом кристаллической решетки мусковита, разрушением кристаллической решетки амфиболов с одновременным удалением группы  $\text{OH-}$  и образованием новых минералов, а при 1194.8  $^{\circ}\text{C}$  — с разрушением кристаллической решетки мусковита, плавлением эпидота, образованием новых кристаллических фаз, а также плавлением микроклина и плагноклазов.

Температуры, доступные для проведения наших экспериментов (до 1515  $^{\circ}\text{C}$ ), естественно, не воспроизводят условия, возникающие при импактном событии.

Однако они могут охватывать один из важнейших температурных интервалов, в котором происходят основные процессы стеклования и кристаллизации. По оценкам В.Л. Масайтиса (Масайтис и др., 1980), температурный диапазон полного плавления кристаллических пород составляет 1200–3000 °С, а частичного плавления с образованием многих характерных импактных расплавных пород — 900–1500 °С. Кроме того, отмечается, что интенсивность термального преобразования находится в прямой зависимости от степени предшествующего ударного сжатия. Если ударные нагрузки не превышают 10–15 ГПа — термальная перекристаллизация начинается при температурах более 950 °С, а при 45 ГПа — уже при 750 °С. Термический анализ показал, что при достаточно тонком измельчении материала исходной шихты (< 1 мм) расплав образуется при температурах ниже 1500 °С.

### 3.2. Структурно-фазовый и химический состав

Количественный фазовый анализ исходных пород для плавки по данным РФА приведен в табл. 3. Рентгенофазовый анализ искусственных стекол на основе этих горных пород показал, что образцы, в основном рентгеноаморфные, могут содержать различные минеральные фазы — кварц, кристобалит, магнетит. Результаты рентгенофазового анализа, приведенные в табл. 4, демонстрируют качественную картину присутствия отдельных кристаллических фаз в полученных образцах. Количественные характеристики здесь не приводятся ввиду невозможности определения точного их содержания при наличии рентгеноаморфной фазы.

Ранее авторами были опубликованы данные РФА импактитов Жаманшина (Esau et al., 2021; Sergienko et al., 2021), где было показано нахождение в них таких кристаллических фаз, как кварц, кристобалит, магнетит, гематит. Фактически мы видим хорошее соответствие фазовых составов для импактных стекол Жаманшина и их искусственных аналогов.

Для доказательства правомерности примененной методики создания искусственных аналогов импактных стекол выполнялось сопоставление наших

Таблица 3. Количественный фазовый анализ образцов исходной шихты (вес. %) по данным полнопрофильного анализа методом Ритвельда\*

Минерал	Базальт (Bas)	ВОП (And)	Сланец (Sha)
Кварц	< 1	14.3	38.2
Плагиоклаз	55	37.9	24.6
Слюда (мусковит)	–	10.9	8.1
Хлорит	–	4	8.5
Кальцит	< 1	–	< 1
Амфибол	–	–	8.5
Микроклин	–	–	2.4
Эпидот	–	28.4	9
Ильменит	1.7	–	–
Вермикулит	3.3	–	–
Пироксены	34.3	–	–
Гематит	–	4.5	–
Магнетит	5	–	–

\* Составлено с использованием (Rietveld, 1969).

Таблица 4. Результаты рентгенофазового анализа искусственных стекол

Образец	R/a	Кварц	Кристобалит	Магнетит
Bas W	+	–	–	–
Bas P	+	–	–	–
Bas C	+	–	–	–
And W	+	–	–	–
And P	+	–	–	–
And C	+	+	–	–
And F	+	+	–	–
Sha W	+	+	+	–
Sha C	+	+	+	–
Sha F	+	+	+	+

Примечание. В таблице обозначено: R/a — рентгеноаморфная фаза.

Таблица 5. Перечень стекол различного генезиса, используемых для сопоставления с данными, полученными в настоящей работе

Образцы	Литературные источники
<i>Технические стекла</i>	
Бутылочное стекло, зеркальное стекло, оконное стекло, выдувное стекло, химическое стекло, свинцовый хрусталь	(Фролов, 2012)
Тринитит	(Cicconi and Neuville, 2019)
<i>Природные стекла неимпактного происхождения</i>	
Фульгуриты	(Cicconi and Neuville, 2019)
Стекло в магматических расплавах основного состава, среднего состава и в кислых магматических расплавах	(Рябов и Золотухин, 1989)
Обсидиан: армянский и кавказский, байкальский, турецкий, средиземноморский	(Cicconi and Neuville, 2019)
Обсидиан из района Ничии	(Lampropoulou et al., 2020)
Обсидиан из озера Красное	(Попов и др., 2017)
Перлиты, карстовые камни, закаленные стекла, стекла Мауна-Лоа, гавайский базальт, слезы Пеле, извержение Килауэа 1959 г., базальтовые стекла, фонолитовые стекла Эребус (Антарктида), тахилит (Килауэа)	(Cicconi and Neuville, 2019)
<i>Тектиты</i>	
Молдавиты, филиппиниты, ивориты, австралиты, баддиаситы, индошиниты, ливийское стекло, гиоргианиты	(Cicconi and Neuville, 2019; Glass, 2016; Rai et al., 2019; Koeberl, 1997)
<i>Импактиты Жаманишина</i>	
Жаманшиниты, иргизиты	(Glass et al., 1983; Масайтис и Селивановская, 1987; Bouška et al., 1981; Koeberl and Fredriksson, 1986; Mizera et al., 2012; Горностаева и др., 2016; Горностаева и др., 2017; Jonášová et al., 2016; Schulz et al., 2020)

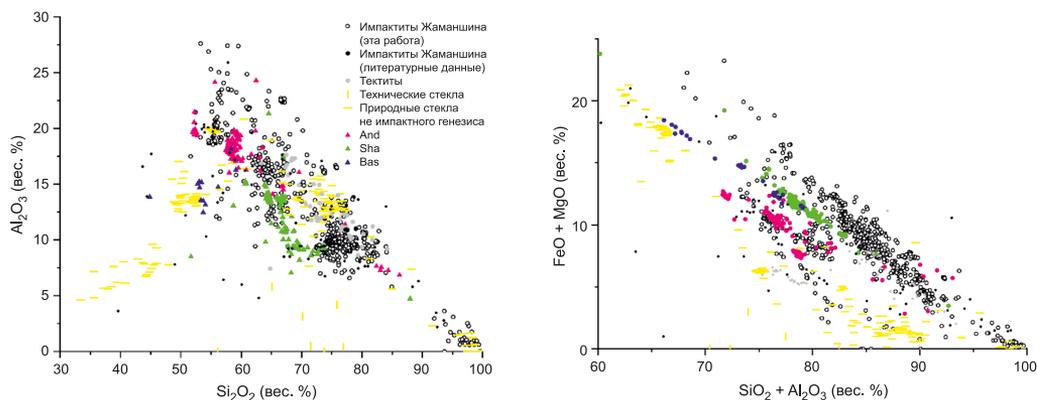


Рис. 5. Диаграммы химического состава импактитов Жаманшина, технических, искусственных стекол и стекол неимпактного генезиса

данных рентгенофлуоресцентного и рентгенофазового анализа (Sergienko, 2022a; Sergienko, 2022b), с составами импактитов Жаманшина (собственных и литературных данных), а также с составами неимпактных природных и техногенных стекол и тектитов (перечень данных и все литературные источники приведены в табл. 5).

Результаты сопоставления данных в координатах  $(\text{SiO}_2) - (\text{Al}_2\text{O}_3)$  и  $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2) - (\text{FeO} + \text{MgO})$  показаны на диаграммах (рис. 5). Анализ диаграмм свидетельствует, что для искусственных образцов, полученных из пород мишени астроблемы Жаманшин, наблюдается хорошее соответствие их химического состава с составом природных жаманшинских стекол, в отличие от стекол из базальтов Ровенского месторождения (Украина); при том эти составы надежно отличаются от составов стекол практически всех других генетических групп. Особенно ярко это проявляется в координатах  $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2) - (\text{FeO} + \text{MgO})$ , что позволяет определить роль железа в формировании петрохимических особенностей, характерных для импактитов, как ключевую.

Далее проводилось сопоставление составов искусственных стекол с разделением их по длительности остывания с составами Жаманшинских импактитов. Диаграммы соотношений оксидов основных химических элементов показаны на рис. 6.

Из анализа диаграмм следует, что химический состав полученных искусственных стекол из пород мишени находится в хорошем соответствии с составом импактных расплавов астроблемы Жаманшин; стекла из базальтов демонстрируют существенные различия. Скорость остывания определяет различия в химическом составе.

Таким способом можно моделировать образование импактных расплавов из различных пород мишени. Так, для Жаманшина до сих пор не существует сколько-нибудь единого мнения о генетической связи жаманшинитов, иргизитов с породами мишени. Предлагаются следующие варианты исходного материала для их образования: расплавленные плотные породы фундамента (Масайтис и Селивановская, 1987), как это имеет место и в ряде других импактных кратеров с двухслойной мишенью (von Engelhardt and Graup, 1984) и др.; испаренная и сконденсированная смесь пород мишени (Флоренский и Дабижа, 1980); различные гомогенизированные смеси из глин и алевролитов, с небольшими добавками ультраосновных пород (Bouška et al., 1981; Schulz et al., 2020); исключительно поверхностные пески

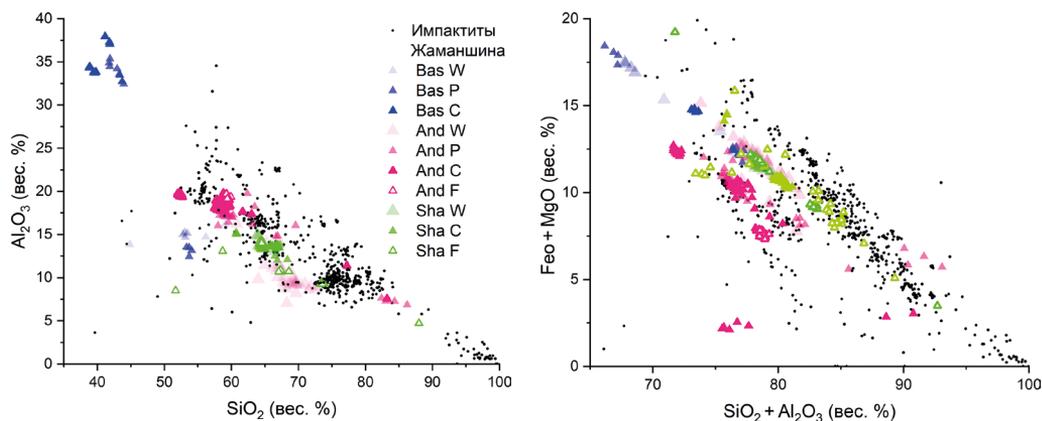


Рис. 6. Диаграммы химического состава импактитов Жаманшина и искусственных стекол, полученных в разных режимах охлаждения

и глины (Shaw and Wasserburg, 1982; Raisbeck et al., 1988; Jonášová et al., 2016); поверхностные слои кварцевого песка, глины и лёсса (Mizera et al., 2012); лёссы и в меньшей степени глины (Фельдман и Сазонова, 1993); импактные расплавы Жаманшина (в предположении двухстадийного импактного события, при участии двух различных по составу ударников) (Скублов и Тюгай, 2005).

Наши данные свидетельствуют, что эта проблема может быть в какой-то мере решена подбором соответствующих смесей пород мишени и условий остывания искусственных аналогов импактных расплавов.

Эти данные могут способствовать пониманию принципов формирования различных импактных образований. Так, например, по поводу механизма формирования иргизитов в литературе наблюдаются существенные разногласия. Есть предположения, что иргизиты и микроиргизиты могли возникнуть на первой стадии импактного процесса при испарении и конденсации пород мишени (Флоренский и Дабижа, 1980), в результате слияния мелких капель расплава размером менее 1 мм (Jonášová et al., 2016), в плазменно-пылевом облаке (Větvicka et al., 2010). Основные же импактные расплавы формировались из более глубокого кристаллического основания преобладающего андезитового характера на следующих этапах (Mizera et al., 2012). Иногда рассматривают как минимум двухстадийный процесс (падение двух, возможно различных по составу, космических тел). Но и тут существуют противоположные взгляды. Так, в работе (Горностаева и др., 2018) авторы полагают, что мелкие капли расплава выплеснулись при первом взрыве. А в исследованиях С.Г. Скублова (Скублов и Тюгай, 2005) показано, что иргизиты могли образовываться при втором падении за счет еще не застывшего после первого удара расплава. Вторичное выплавление иргизитов не исключал и Э.П. Изох — один из первых исследователей Жаманшина (Изох, 1986; Изох и Ле, 1983). Единым является мнение о наиболее высокоскоростном («мгновенном») процессе застывания (стеклования) иргизитов по сравнению с импактными расплавами других типов при максимальных температурах исходного материала.

«Воссоздать» условия остывания импактных расплавов и их последующего остывания, стеклования и кристаллизации можно с помощью создания искусственных стекол.

### 3.3. Сканирующая электронная микроскопия

Результаты СЭМ-исследований отражены на рис. 7. Микроминералогические исследования показали, что пленка на поверхности образцов стекол представлена оксидами (гидроксидами) железа и возникает на всех образцах. С увеличением времени охлаждения она становится более плотной. Но даже при быстром охлаждении

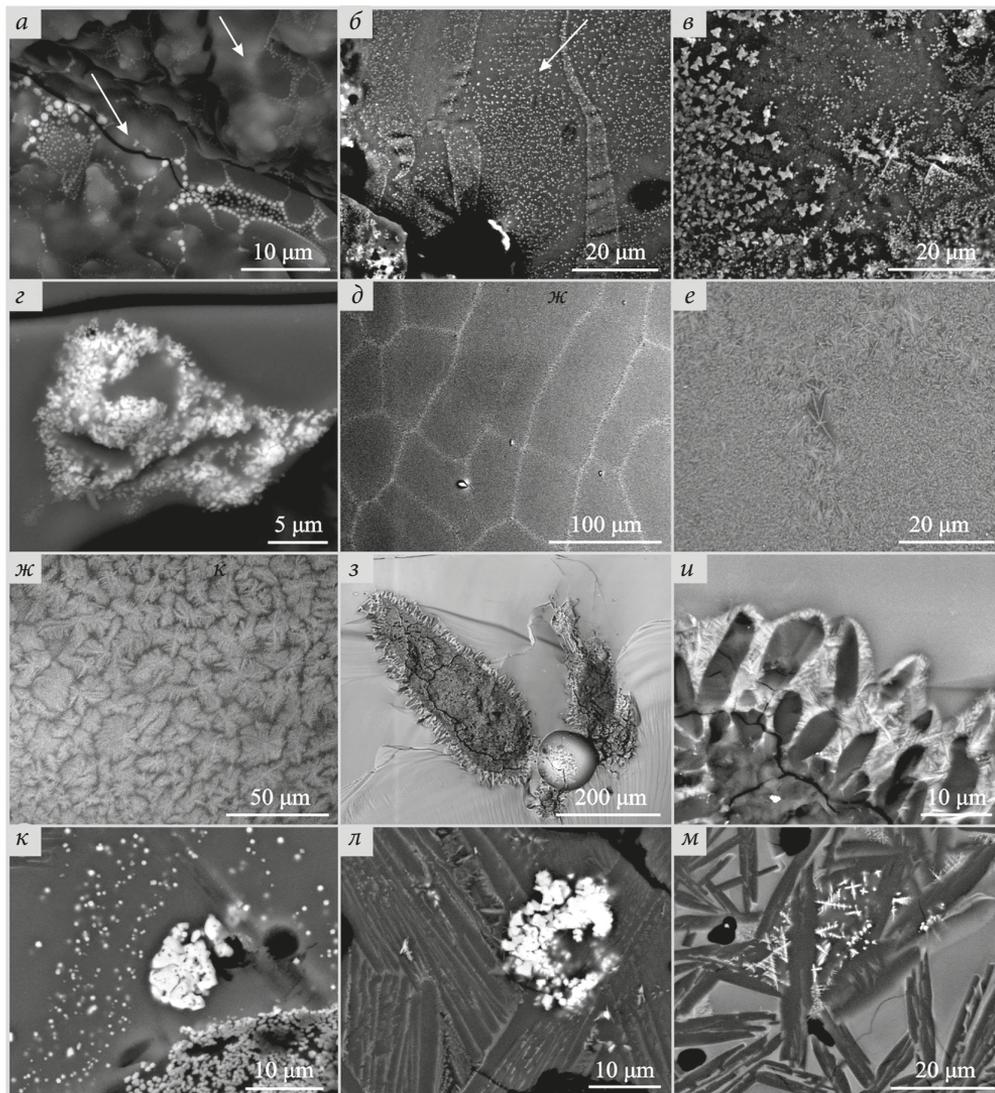


Рис. 7. СЭМ-изображения, отраженные электроны: эмульсионные капли оксидов железа (а); зародыши кристаллитов оксидов железа (б), переходящие в скелетные, вершинно-реберные и полногранные формы (в); скопления зерен оксидов железа в стекле (г); скелетные микрокристаллиты по трещинам остывания, образовавшимся в процессе охлаждения (д, е); скелетные кристаллы в поверхностной пленке (ж) и нерасплавленные включения в объеме стекла, на поверхности которых возникает микродрузовый рост кристаллитов кварца и скелетных агрегатов оксидов железа (з, и); аналогичные образования в природных стеклах Жаманшина (к, л, м)

в воде на поверхности стекла начинаются процессы минералообразования. Оксиды железа выделяются в виде скоплений эмульсионных капель либо мельчайших зерен (рис. 7, а, б), переходящих к вершинно-реберным формам и даже полногранному росту кристаллитов (рис. 7, в). Иногда образуют скопления зерен (рис. 7, г), на образцах из базальтов и вулканогенно-осадочных пород выделяются в виде эмульсионных капель. По мере охлаждения, за счет уменьшения объема, начинают проявляться «трещины остывания», аналогичные контракционным трещинам, возникающим при остывании эффузивных магматических пород и разбивающим породу на полигональные участки. Эти скрытые трещины, не успевая полностью раскрыться, представляют собой ослабленные зоны, в которых начинается скелетный рост минералов (рис. 7, д, е).

В случае не полностью расплавленной породы (кристаллические сланцы) с сохранившимися реликтами  $\text{SiO}_2$  при длительном охлаждении в печи кристаллизация происходит и на поверхности, и во внутреннем объеме, где температура падает медленнее. Поверхностная пленка здесь представлена скелетными кристаллитами оксидов железа (рис. 7, ж). Внутренний объем содержит нерасплавленный кремнезем и новообразования. Реликтовые зерна здесь служат поверхностью нарастания микродрозовых агрегатов. В них хорошо виден геометрический отбор. По морфологии можно предположить, что призматические кристаллиты являются кварцем. А на последних стадиях охлаждения образуются скелетные агрегаты оксидов (гидроксидов) железа (рис. 7, з, и). Аналогичные явления мы наблюдаем и в природных стеклах (рис. 7, к–м).

#### 4. Заключение

Предложенная в данной работе методика получения аналогов импактных расплавов в высокотемпературной печи показала свою правомерность. За счет подбора размера фракции шихты стало возможным получить полный гомогенный расплав в необходимом объеме исходного материала (объем тиглей —  $200 \text{ см}^3$ ) при доступных для экспериментов температурах (до  $1515 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Исследования химического и структурно-фазового состава искусственных стекол, полученных из пород мишени астроблемы Жаманшин, показали хорошее соответствие Жаманшинским импактным расплавам. Подбор параметров создания искусственных аналогов импактитов может привести к «воссозданию» условий возникновения импактных расплавов и их последующего остывания, стеклования и кристаллизации. Важную роль в формировании химического и структурно-фазового состава импактных стекол играют окислительно-восстановительные условия (скорость остывания) и наличие контактных зон (границ разделов сред). В формировании петрохимических особенностей, характерных для импактитов, железо играет ключевую роль.

#### Литература

Арискин, А. А., Мешалкин, С. С., Альмеев, Р. Р., Бармина, Г. С., Николаев, Г. С. (1997). Информационно-поисковая система INFOREX: анализ и обработка экспериментальных данных по фазовым равновесиям в изверженных горных породах. *Петрология*, 5 (1), 28–36.

- Бойко, Я. И., Коробков, В. Ф., Баймагамбетов, Б. К., Сапожников, П. К., Улукпанов, К. Т. (2009). Астроблема Жаманшин: нереализованные и предстоящие задачи исследований. *Уральский геологический журнал*, 6, 40–50.
- Бутвина, В. Г., Сафонова, О. Г., Литвин, Ю. А. (2009). Экспериментальное исследование плавления эколгита с участием флюида  $H_2O-CO_2-KCl$  при 5 ГПа. *Доклады Академии наук*, 427 (3), 365–369.
- Горностаева, Т. А., Мохов, А. В., Карташов, П. М., Богатилов, О. А. (2016). Конденсатные стекла кратера Жаманшин. I. Иргизиты. *Петрология*, 24 (1), 1–20. <https://doi.org/10.1134/S0869591115060028>
- Горностаева, Т. А., Мохов, А. В., Карташов, П. М., Богатилов, О. А. (2017). Конденсатные стекла кратера Жаманшин. II. Жаманшиниты. *Петрология*, 25 (1), 3–25. <https://doi.org/10.1134/S0869591117010039>
- Горностаева, Т. А., Мохов, А. В., Карташов, П. М., Богатилов, О. А. (2018). Тип ударника и модель образования кратера Жаманшин, Казахстан. *Петрология*, 26 (1), 92–106. <https://doi.org/10.1134/S0869591118010046>
- Граменицкий, Е. Н., Котельников, А. Р., Батанова, А. М., Щекина, Т. И., Плечов, П. Ю. (2000). *Экспериментальная и техническая петрология*. М.: Научный мир.
- Иванова, В. П., Касатов, Б. К., Красавина, Т. Н., Розина, Е. Л. (1974). *Термический анализ минералов и горных пород*. Л.: Недра.
- Изох, Э. П. (1986). *Петрохимия пород мишени, импактитов и тектитов астроблемы Жаманшин. Космическое вещество и Земля*. Новосибирск: Наука, 159–203.
- Изох, Э. П. и Ле, Д. А. (1983). Тектиты Вьетнама. Гипотеза кометной транспортировки. *Метеоритика*, 42, 158–169.
- Козлов, Е. А. и Сазонова, Л. В. (2012). Преобразования горных пород в сферических ударных волнах: новые экспериментальные результаты. *Петрология*, 20 (4), 334–334. <https://doi.org/10.1134/S0869591112040066>
- Курьева, Р. Г. и Сурков, Н. В. (2012). Показатель преломления и сжимаемость стекла состава  $Di(64)Ap(36)$  в интервале давлений 0–5.0 ГПа. *Геохимия*, 12, 1140–1146. <https://doi.org/10.1134/S0016702912120038>
- Масайтис, В. Л. (1983). *Структуры и текстуры взрывных брекчий и импактитов*. Л.: Недра.
- Масайтис, В. Л., Данилин, А. Н., Мащак, М. С. (1980). *Геология астроблем*. Л.: Недра.
- Масайтис, В. Л. и Селивановская, Т. В. (1987). Петрохимические типы импактных расплавов кратера Жаманшин и их реконструируемые исходные субстраты. *Записки ВМО*, 116, 52–59.
- Попов, В. К., Гребеников, А. В., Кузьмин, Я. В., Гласкок, М. Д., Ноздрачев, Е. А., Будницкий, С. Ю., Воробей, И. Е. (2017). Геохимия обсидианов озера Красное на Чукотке (Северо-Восток Сибири). *Доклады академии наук*, 476 (3), 332–338.
- Рябов, В. В. и Золотухин, В. В. (1989). *Ликвация в природных стеклах на примере траптов*. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1989.
- Скублов, С. Г. и Тюгай, О. М. (2005). Геохимия импактных стекол кратера Жаманшин (по данным ионного микрозонда). *Геохимия*, 7, 779–785.
- Соболев Р. Н. (2017). Температурный интервал плавления кристаллического вещества. *Доклады Академии наук*, 473 (3), 351–354.
- Соболев, Р. Н., Мальцев, В. В., Волкова, Е. А. (2020). Экспериментальное изучение процесса плавления минералов и горных пород. *Расплавы*, 3, 246–257.
- Фельдман, В. И. и Сазонова, Л. В. (1993). Условия образования и застывания импактных расплавов в астроблеме Жаманшин. *Петрология*, 1 (6), 596–614.
- Флоренский, П. В. и Дабига, А. И. (1980). *Метеоритный кратер Жаманшин*. М.: Наука.
- Фролов, К. В. (2012). *Машиностроение: энциклопедия*. М.: Машиностроение.
- Шарыгин, И. С., Литасов, К. Д., Шацкий, А. Ф., Головин, А. В., Отани, Е., Похиленко, Н. П. (2013). Экспериментальное исследование плавления кимберлита трубки удачная-восточная при 3–6.5 ГПа и 900–1500 °С. *Доклады академии наук*, 448 (4), 452–452. <https://doi.org/10.1134/S1028334X13020086>
- Baduykov, D. D., Bezaeva, N. S., Rochette, P., Gattaccesca, J., Feinberg, J. M., Kars, M., Kuzina, D. M. (2018). Experimental shock metamorphism of terrestrial basalts: Agglutinate-like particle formation, petrology, and magnetism. *Meteoritics & Planetary Science*, 53 (1), 131–150. <https://doi.org/10.1111/maps.13006>
- Bouška, V., Povondra, P., Florenskij, P., Řanda, Z. (1981). Irghezites and zhamanshinites: Zhamanshin crater USSR. *Meteoritics*, 16 (2), 171–184. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1981.tb00541.x>

- Cicconi, M. R. and Neuville, D. R. (2019). Natural glasses. In: J. D. Musgraves, J. Hu, L. Calvez, eds, *Springer Handbook of Glass*. Springer, Cham. 771–812. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-93728-1\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93728-1_22)
- Esau, A., Hamann, C., Kaufmann, F. E. D., Sergienko, E., Yanson, S., Karpinsky, V., Hecht, L. (2021). *Heterogeneities of Impact Melts from the Zhamanshin Crater: A Two-Stage Mixing Scenario?* Lunar Planet. Sci. XXVIII. Lunar Planet. Inst., Houston. #2548 (abstr.).
- French, B. and Short, N. (1968). *Shock metamorphism of natural material*. Baltimore: Mono Book Corp. <https://doi.org/10.1126/science.153.3738.903.b>
- French, B. M. and Koeberl, C. (2010). The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: what works, what doesn't, and why. *Earth-Science Reviews*, 98 (1–2), 123–170. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.10.009>
- Glass, B. P., Fredriksson, K., Florensky, P. V. (1983). Microirghizites recovered from a sediment sample from the Zhamanshin impact structure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88 (S01), B319–B330.
- Glass B. P. (2016) Glass: the geologic connection. *International Journal of Applied Glass Science*, 7 (4), 435–445. <https://doi.org/10.1111/ijag.12240>
- Jonášová Š., Ackerman, L., Žák, K., Skála, R., Ďurišová, J., Deutsch, A., Magna, T. (2016). Geochemistry of impact glasses and target rocks from the Zhamanshin impact structure. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 190, 239–264. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.06.031>
- Koeberl, C. (1997). Libyan Desert Glass: geochemical composition and origin. *Silicon*, 96, 121–131.
- Koeberl, C. and Fredriksson, K. (1986). Impact glasses from Zhamanshin crater (USSR): Chemical composition and discussion of origin. *Earth and planetary science letters*, 78(1), 80–88. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(86\)90174-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(86)90174-3)
- Lampropoulou, P., Laskaris, N., Petrounias, P., Giannakopoulou, P. P., Rogkala, A., Kalampounias, A. G., Iliopoulos, I. (2020). Petrogeochemical approaches to the characterization of obsidian derived from Nychia area (Milos Island, Greece) using combined methods. *Microchemical Journal*, 156, 104843. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104843>
- Melosh, H. J. (1989). *Impact cratering: A geologic process*. New York: Oxford University Press. Oxford: Clarendon Press.
- Mizera, J., Řanda, Z., Tomandl, I. (2012). Geochemical characterization of impact glasses from the Zhamanshin crater by various modes of activation analysis. Remarks on genesis of irghizites. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1, 359–376. <https://doi.org/10.1007/s10967-012-1673-6>
- Osinski, G. R. and Pierazzo, E. (2013). *Impact cratering: Processes and products*. John Wiley & Sons.
- Rai, A. K., Pati, J. K., Kumar, R. (2019). Spectro-chemical study of moldavites from Ries impact structure (Germany) using LIBS. *Optics & Laser Technology*, 114, 146–157. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.01.028>
- Raisbeck, G. M., Yiou, F., Zhou, S. Z., Koeberl, C. (1988). BE-10 in irghizite tektites and zhamanshinite impact glasses. *Chemical Geology*, 70, 120. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90540-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90540-2)
- Rietveld, H. M. (1969). A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. *Journal of Applied Crystallography*, 2, 65–71.
- Schmieder, M. and Kring, D. A. (2020). Earth's Impact Events Through Geologic Time: A List of Recommended Ages for Terrestrial Impact Structures and Deposits. *Astrobiology*, 1, 91–141. <https://doi.org/10.1089/ast.2019.2085>
- Schulz, T., Sackl, F., Fragner, E., Luguet, A., van Acken, D., Abate, B., Badjukov, D., Koeberl, C. (2020). The Zhamanshin impact structure, Kazakhstan: A comparative geochemical study of target rocks and impact glasses. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 268, 209–229. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.08.045>
- Sergienko, E. S., Yanson, S. Y., Kosterov, A., Kharitonskii, P. V., Frolov, A. M. (2021). Suvietes and Tagamites of Zhamanshin Astrobleme: Distribution in the Crater and Petrographic Features. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 4, 042080. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/4/042080>
- Sergienko, E. (2022a). EPMA Data for Obtaining artificial analogues of impact glasses by high-temperature melting. *Mendeley Data*, 2. <https://doi.org/10.17632/n3hrnxwmv8.2>
- Sergienko, E. (2022b). X-ray fluorescent data for Obtaining artificial analogues of impact glasses by high-temperature melting. *Mendeley Data*, 2. <https://doi.org/10.17632/dwxyww6c6b.2>
- Shaw, H. F. and Wasserburg, G. J. (1982). Age and provenance of the target materials for tektites and possible impactites as inferred from Sm-Nd and Rb-Sr systematics. *Earth and Planetary Science Letters*, 60, 155–177. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(82\)90001-2](https://doi.org/10.1016/0012-821X(82)90001-2)

- Stöffler, D. and Grieve, R. A. F. (2007). Impactites. In: D. Fettes and J. Desmons, eds, *Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.3749/canmin.45.6.1545>
- Surkov, N. V. and Gartvich, Y. G. (2012). Physicochemical model for the crystallization of rocks of the calcalkaline series. *Geochemistry International*, 10, 799–815. <https://doi.org/10.1134/S0016702912100060>
- Surkov, N. V., Gartvich, Y. G., Izokh, O. P. (2007). Stability and phase relations of nonstoichiometric clinopyroxenes in the join diopside-Ca-Eskola component at high pressures. *Geochemistry International*, 6, 569–579. <https://doi.org/10.1134/S0016702907060055>
- Ubbelohde, A. R. (1950). Melting and crystal structure. *Quarterly Review*, 4, 356–381. <https://doi.org/10.1039/QR9500400356>
- Ubbelohde, A. R. (1965). Melting and Crystal Structure — Some Current problems. *Angewandte Chemie Int. ed.*, 7, 587–591. <https://doi.org/10.1002/anie.196505871>
- Větvíčka, I., Frank, J., Drtina, J. (2010). Electron microprobe analysis (WDS EPMA) of Zhamanshin glass reveals the impactor and a common role of accretion in the origin of splash-form impact glass. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1, 012029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/7/1/012029>
- Von Engelhardt, W. and Graup, G. (1984). Suevite of the Ries crater, Germany: Source rocks and implications for cratering mechanics. *Geologische Rundschau*, 73 (2), 447–481. <https://doi.org/10.1007/BF01824968>

Статья поступила в редакцию 27 сентября 2022 г.  
Статья рекомендована к печати 15 февраля 2024 г.

#### Контактная информация:

Сергиенко Елена Сергеевна — e.sergienko@spbu.ru  
Янсон Светлана Юрьевна — jansn.sv@gmail.com  
Карпинский Владимир Вадимович — karp@geo.phys.spbu.ru  
Левицкий Иван Адамович — levitskii@belstu.by  
Папко Людмила Федоровна — papko@belstu.by  
Харитонский Петр Владимирович — peterkh@yandex.ru

## Obtaining artificial analogs of Zhamanshin impact glasses by high-temperature melting\*

E. S. Sergienko<sup>1</sup>, S. Yu. Yanson<sup>1</sup>, V. V. Karpinskiy<sup>1,2</sup>, I. A. Levitskii<sup>2</sup>, L. F. Papko<sup>3</sup>, P. V. Kharitonskii<sup>4</sup>

<sup>1</sup> St. Petersburg State University,  
7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

<sup>2</sup> Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences,  
189, pr. Lenina, Obninsk, 249035, Russian Federation

<sup>3</sup> Belarusian State Technological University,  
13A, ul. Sverdlova, Minsk, 220006, Belarus

<sup>4</sup> Ioffe Institute,  
26, ul. Politrkhnicheskaya, St. Petersburg, 194021, Russian Federation

---

\*The experiments were carried out using the equipment of the Scientific Park of St. Petersburg State University (RC “Microscopy and Microanalysis”, RC “X-ray diffraction research methods”, RC “Methods of substance composition Analysis”) and the Belarusian State Technological University. The melting of rocks was carried out under an agreement between St. Petersburg University and the Belarusian State Technological University (C-RC 19/3 dated 08/07/2021).

**For citation:** Sergienko, E. S., Yanson, S. Yu., Karpinskiy, V. V., Levitskii, I. A., Papko, L. F., Khariton-skii, P. V. (2024). Obtaining artificial analogs of Zhamanshin impact glasses by high-temperature melting. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 69 (2), 333–355. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.207> (In Russian)

Establishing the genesis of coptogenic rocks and their evolution over geological time is of great importance for constructing scenarios of impact events and studying petrophysical properties of rocks in general. In spite of the fact that the Zhamanshin astrobleme (Kazakhstan) has been studied for 85 years, there are still many unsolved issues, including those in the field of modeling this impact event. Artificial analogs of impact glasses, various types of which are widespread in Zhamanshin, could reproduce the most characteristic features of natural objects in terms of their composition and morphology. By obtaining model samples from furnace charges of different composition, it is possible to project their characteristics on impactites by varying the cooling conditions that determine the processes of glass transition and crystallization. In this study, artificial analogs of impact glasses of the Zhamanshin astrobleme were obtained by melting the rocks of the astrobleme target. A gas-flame high-temperature furnace was used. The initial charge for melting was prepared in such a way as to obtain a complete melt in a sufficiently large sample volume (comparable with the volumes of some types of natural impactites of Zhamanshin — zhamanshinites and irghizites). The chemical and structural-phase composition of the artificial glasses was investigated by X-ray diffraction (XRD) and X-ray spectral fluorescence (XRF) analysis, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray spectral microanalysis (XRMA). Differential scanning calorimetry was carried out to determine the phase transitions and chemical transformations of the source rocks under temperature changes. The chemical and structural-phase composition of the obtained glasses was compared with the characteristics of the Zhamanshin impactites and glasses of other genesis. The artificial glasses are identical to the Zhamanshin impactites. The proposed technique of obtaining analogs of impact glasses has shown its validity.

*Keywords:* Zhamanshin astrobleme, artificial analogs of impactites, glass, high-temperature melting.

## References

- Ariskin, A. A., Meshalkin, S. S., Almeev, R. R., Barmina, G. S., Nikolaev, G. S. (1997). INFOREX information retrieval system: Analysis and processing of experimental data on phase equilibria in igneous rocks. *Petrology*, 5 (1), 28–36.
- Badyukov, D. D., Bezaeva, N. S., Rochette, P., Gattaccecchia, J., Feinberg, J. M., Kars, M., Kuzina, D. M. (2018). Experimental shock metamorphism of terrestrial basalts: Agglutinate-like particle formation, petrology, and magnetism. *Meteoritics & Planetary Science*, 53 (1), 131–150. <https://doi.org/10.1111/maps.13006>
- Bouška, V., Povondra, P., Florenskij, P., Řanda, Z. (1981). Irghizites and zhamanshinites: Zhamanshin crater USSR. *Meteoritics*, 16 (2), 171–184. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1981.tb00541.x>
- Boyko, Y. I., Korobkov, V. F., Baymagambetov, B. K., Sapozhnikov, P. K., Ulukpanov, K. T. (2009). Zhamanshin Astrobleme: Unrealized and forthcoming research tasks. *Ural'skii geologicheskii zhurnal*, (6), 40–50 (In Russian)
- Butvina, V. G., Safonov, O. G., Litvin, Y. A. (2009). Experimental study of eclogite melting with participation of the H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-KCl fluid at 5 GPa. *Doklady Akademii nauk*, 427(2), 956–960. (In Russian)
- Cicconi, M. R. and Neuville, D. R. (2019). Natural glasses. In: J. D. Musgraves, J. Hu, L. Calvez, eds., *Springer Handbook of Glass*. Springer, Cham. 771–812. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-93728-1\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93728-1_22)
- Danilin, A. N., Masaitis, V. L., Mashchak, M. S. (1980). *Geologiya astroblem*. Leningrad: Nedra Publ. (In Russian)
- Esau, A., Hamann, C., Kaufmann, F. E. D., Sergienko, E., Yanson, S., Karpinsky, V., Hecht, L. (2021). *Heterogeneities of Impact Melts from the Zhamanshin Crater: A Two-Stage Mixing Scenario?* Lunar Planet. Sci. XXVIII. Lunar Planet. Inst., Houston. #2548 (abstr.).

- Feldman, V. I. and Sazonova, L. V. (1993) Conditions of impact melt formation and solidification in the Zhamanshin astrobleme. *Petrology*, 1 (6), 596–614. (In Russian)
- Florenskii, P. V. and Dabizha, A. I. (1980). *The Zhamanshin meteorite crater*. Moscow: Nauka Publ. (In Russian)
- French, B. and Short, N. (1968). *Shock metamorphism of natural material*. Baltimore: Mono Book Corp. <https://doi.org/10.1126/science.153.3738.903.b>
- French, B. M. and Koeberl, C. (2009). The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: what works, what doesn't, and why. *Earth-Science Reviews*, 98(1–2), 123–170. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.10.009>
- Frolov, K. V. (2003) *Mechanical Engineering: encyclopaedia*. Moscow: Mashinostroenie Publ. (In Russian)
- Glass, B. P., Fredriksson, K., Florensky, P. V. (1983). Microirghizites recovered from a sediment sample from the Zhamanshin impact structure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88(S01), B319–B330.
- Glass, B. P. (2016) Glass: the geologic connection. *International Journal of Applied Glass Science*, 7 (4), 435–445. <https://doi.org/10.1111/ijag.12240>
- Gornostaeva, T. A., Mokhov, A. V., Kartashov, P. M., Bogatikov, O. A. (2016). Condensate glasses from the Zhamanshin crater. I. Irghizites. *Petrology*, 24 (1), 1–20. <https://doi.org/10.1134/S0869591115060028> (In Russian)
- Gornostaeva, T. A., Mokhov, A. V., Kartashov, P. M., Bogatikov, O. A. (2017). Condensate glasses from the Zhamanshin crater. II. Zhamanshinites. *Petrology*, 25 (1), 1–22. <https://doi.org/10.1134/S0869591117010039> (In Russian)
- Gornostaeva, T. A., Mokhov, A. V., Kartashov, P. M., Bogatikov, O. A. (2018) Impactor type and model of the origin of the Zhamanshin Astrobleme, Kazakhstan. *Petrology*, 26 (1), 82–95. <https://doi.org/10.1134/S0869591118010046> (In Russian)
- Gramenitsky, E. N., Kotelnikov, A. R., Batanova, A. M., Shchekina, T. I., Plechov, P. Yu. (2000). *Experimental and technical petrology*. Moscow: Scientific World Publ. (In Russian)
- Ivanova, V. P., Kasatov, B. K., Krasavina, T. N., Rozinova, E. L. (1974). *Thermal analysis of minerals and rocks*. Leningrad: Nedra Publ. (In Russian)
- Izokh, E. P. (1986). Petrochemistry of target rocks, impactites, and tektites of the Zhamanshin astrobleme. In: *Kosmicheskoe veshchestvo i Zemlya (Cosmic Matter and the Earth)*. Novosibirsk: Nauka Publ. 159–203. (In Russian)
- Izokh, E. P. and Le, D. A. (1983). Tektites of Vietnam. Hypothesis of comet transportation. *Meteoritika*, 42, 158–169. (In Russian)
- Jonášová, Š., Ackerman, L., Žák, K., Skála, R., Ďurišová, J., Deutsch, A., Magna, T. (2016). Geochemistry of impact glasses and target rocks from the Zhamanshin impact structure. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 190, 239–264. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.06.031>
- Koeberl, C. (1997). Libyan Desert Glass: geochemical composition and origin. *Silicon*, 96, 121–131.
- Koeberl, C. and Fredriksson, K. (1986). Impact glasses from Zhamanshin crater (USSR): chemical composition and discussion of origin. *Earth and planetary science letters*, 78 (1), 80–88. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(86\)90174-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(86)90174-3)
- Kozlov, E. A. and Sazonova, L. V. (2012). Rock transformations in spherically converging shock waves: Newly obtained experimental results. *Petrology*, 20 (4), 301–316. <https://doi.org/10.1134/S0869591112040066> (In Russian)
- Kuryaeva, R. G. and Surkov, N. V. (2012). Refractive index and compressibility of Di(64) An(36) glass over a pressure range of 0–5.0 GPa. *Geochemistry International*, 12, 1026–1031. <https://doi.org/10.1134/S0016702912120038> (In Russian)
- Lampropoulou, P., Laskaris, N., Petrounias, P., Giannakopoulou, P. P., Rogkala, A., Kalampounias, A. G., Iliopoulos, I. (2020). Petrogeochemical approaches to the characterization of obsidian derived from Nychia area (Milos Island, Greece) using combined methods. *Microchemical Journal*, 156, 104843. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104843>
- Masaitis, V. L. (1983). *Structures and textures of explosive breccias and impactites*. Leningrad: Nedra Publ. (In Russian)
- Masaitis, V. L. and Selivanovskaya, T. V. (1987). Chemical types of impact glasses at the Zhamanshin crater and their reconstructed protoliths. *International Geology Review*, 2, 178–184. (In Russian)
- Melosh, H. J. (1989). *Impact cratering: A geologic process*. New York: Oxford University Press. Oxford: Clarendon Press.

- Mizera, J., Řanda, Z., Tomandl, I. (2012). Geochemical characterization of impact glasses from the Zhamanshin crater by various modes of activation analysis. Remarks on genesis of irghizites. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1, 359–376. <https://doi.org/10.1007/s10967-012-1673-6>
- Osinski, G. R. and Pierazzo, E. (2013). *Impact cratering: Processes and products*. John Wiley & Sons.
- Popov, V. K., Grebennikov, A. V., Kuzmin, Y. V., Glascock, M. D. Nozdrachev, E. A. Budnitsky, S. Y., Vorobey, I. E. (2017). Geochemistry of obsidian from Krasnoe Lake on the Chukchi Peninsula (North-eastern Siberia). *Doklady Akademii nauk*, 1, 1099–1104. (In Russian)
- Rai, A. K., Pati, J. K., Kumar, R. (2019). Spectro-chemical study of moldavites from Ries impact structure (Germany) using LIBS. *Optics & Laser Technology*, 114, 146–157. <https://doi.org/10.1016/j.optlas-tec.2019.01.028>
- Raisbeck, G. M., Yiou, F., Zhou, S. Z., Koeberl, C. (1988). BE-10 in irghizite tektites and zhamanshinite impact glasses. *Chemical Geology*, 70, 120. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90540-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90540-2)
- Rietveld, H. M. (1969). A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. *Journal of Applied Crystallography*, 2, 65–71.
- Ryabov, V. V. and Zolotukhin, V. V. (1989). *Liquation in natural glasses on an example of traps*. Novosibirsk: Nauka. Siberian Branch Publ. (In Russian)
- Schmieder, M. and Kring, D. A. (2020). Earth's Impact Events Through Geologic Time: A List of Recommended Ages for Terrestrial Impact Structures and Deposits. *Astrobiology*, 1, 91–141. <https://doi.org/10.1089/ast.2019.2085>
- Schulz, T., Sackl, F., Fragner, E., Luguët, A., van Acken, D., Abate, B., Badjukov, D. Koeberl, C. (2020). The Zhamanshin impact structure, Kazakhstan: A comparative geochemical study of target rocks and impact glasses. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 268, 209–229. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.08.045>
- Sergienko, E. S., Yanson, S. Y., Kosterov, A., Kharitonov, P. V., Frolov, A. M. (2021). Suevites and Tagamites of Zhamanshin Astrobleme: Distribution in the Crater and Petrographic Features. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 4, 042080. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/4/042080>
- Sergienko, E. (2022a). EPMA Data for Obtaining artificial analogues of impact glasses by high-temperature melting. *Mendeley Data*, 2. <https://doi.org/10.17632/n3hrnxwmv8.2>
- Sergienko, E. (2022b). X-ray fluorescent data for Obtaining artificial analogues of impact glasses by high-temperature melting. *Mendeley Data*, 2. doi: 10.17632/dwxyww6c6b.2
- Sharygin, I. S., Litasov, K. D., Shatsky, A. F., Golovin, A. V., Otani, E., Pokhilenko, N. P. (2013). Melting of kimberlite of the Udachnaya-East pipe: Experimental study at 3–6.5 GPa and 900–1500 °C. *Doklady Akademii nauk*, 2, 200–205. <https://doi.org/10.1134/S1028334X13020086>
- Shaw, H. F. and Wasserburg, G. J. (1982). Age and provenance of the target materials for tektites and possible impactites as inferred from Sm-Nd and Rb-Sr systematics. *Earth and Planetary Science Letters*, 60, 155–177. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(82\)90001-2](https://doi.org/10.1016/0012-821X(82)90001-2)
- Skublov, S. G. and Tyugai, O. M. (2005). Geochemistry of impact glasses from the Zhamanshin Crater: Ion microprobe data. *Geochemistry*, 7, 779–785. (In Russian)
- Sobolev, R. N. and Maltsev, V. V. (2015). The temperature range of melting of crystalline material. *Doklady Akademii nauk*, 2, 85–90. (In Russian)
- Sobolev, R. N., Maltsev, V. V., Volkova, E. A. (2020). Experimental investigation of the melting of minerals and rocks. *Russian Metallurgy*, 3, 246–257. (In Russian)
- Stöffler, D. and Grieve, R. A. F. (2007). Impactites. In: D. Fettes and J. Desmons, eds, *Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.3749/canmin.45.6.1545>
- Surkov, N. V. and Gartvich, Y. G. (2012). Physicochemical model for the crystallization of rocks of the calcalkaline series. *Geochemistry International*, 10, 799–815. <https://doi.org/10.1134/S0016702912100060>
- Surkov, N. V., Gartvich, Y. G., Izokh, O. P. (2007). Stability and phase relations of nonstoichiometric clinopyroxenes in the join diopside-Ca-Eskola component at high pressures. *Geochemistry International*, 6, 569–579. <https://doi.org/10.1134/S0016702907060055>
- Ubbelohde, A. R. (1950). Melting and crystal structure. *Quarterly Review*, 4, 356–381. <https://doi.org/10.1039/QR9500400356>
- Ubbelohde, A. R. (1965). Melting and Crystal Structure — Some Current problems. *Angewandte Chemie Int. Ed.* 7, 587–591. <https://doi.org/10.1002/anie.196505871>

- Větvička, I., Frank, J., Drtina, J. (2010). Electron microprobe analysis (WDS EPMA) of Zhamanshin glass reveals the impactor and a common role of accretion in the origin of splash-form impact glass. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1, 012029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/7/1/012029>
- Von Engelhardt, W. and Graup, G. (1984). Suevite of the Ries crater, Germany: Source rocks and implications for cratering mechanics. *Geologische Rundschau*, 73 (2), 447–481. <https://doi.org/10.1007/BF01824968>

Received: September 27, 2022

Accepted: February 15, 2024

Authors' information:

*Elena S. Sergienko* — e.sergienko@spbu.ru

*Svetlana Yu. Yanson* — jansn.sv@gmail.com

*Vladimir V. Karpinskiy* — karp@geo.phys.spbu.ru

*Ivan A. Levitskii* — levitskii@belstu.by

*Liydmila F. Papko* — papko@belstu.by

*Petr V. Kharitonskii* — peterkh@yandex.ru