

Микроскопические следы Чулымского болида, падение 1984 года

В. А. Цельмович¹, В. Г. Шельмин², Л. П. Максе³

¹Геофизическая обсерватория “Борок” – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 152742, Ярославская обл., п. Борок, e-mail: tselm@mail.ru

²ООО “Экомонитор”, 634050, Томская обл., г. Томск, с. Кисловка, ул. Мира, 3/7, e-mail: chulyymb@mail.ru

³ОДО “СТРИМ”, 212029, г. Могилёв, ул. Габровская, 17, Республика Беларусь, e-mail: larissa_maxe@rambler.ru

Поступила в редакцию 23.01.2025 г., принята к печати 07.03.2025 г.

Объект исследования. Чулымский болид, падение 1984 г. **Цель.** Выявление диагностических признаков частиц кометного происхождения, извлеченных из “следа” Чулымского космического тела, анализ данных для его отнесения к фрагменту ядра кометы. **Методы.** Изучены торфяные колонки, отобранные в трех точках по трассе полета Чулымского космического тела. Для исследований использовались оптический микроскоп “Olympus BX 51M”, сканирующий электронный микроскоп “Tescan Vega II” с приставкой для энергодисперсионного количественного микроанализа “Drucool”. **Результаты.** Кометная природа Чулымского космического тела принята авторами в качестве рабочей гипотезы, в соответствии с ней проводили наземный поиск “следов” взорвавшегося болида – фрагмента кометы – в форме микроскопических космических частиц. Как наиболее вероятную авторы рассматривают версию теплового взрыва Чулымского космического тела при торможении в плотных слоях атмосферы. Проведена инициативная экспедиция для сбора проб, содержащих предполагаемые “следы” кометного вещества. Исследованы частицы, извлеченные из проб, отобранных в трех точках следа Чулымского космического тела близ Минаевки. Некоторые обнаруженные частицы авторы отнесли к веществу разрушенного взрывом болида на основании рабочей гипотезы о том, что Чулымское космическое тело – фрагмент кометы. **Выводы.** Частицы, обнаруженные в пробах из трех точек отбора, различаются по микроструктуре, что может отражать взаимодействие космогенного вещества с земным веществом на различных стадиях полета болида. Среди частиц, выделенных из “следа” Чулымского космического тела, обнаружены железосодержащие алюмосиликатные микросферы с уникальной тонковолокнистой микроструктурой, переходящей в наноструктурные особенности, которые не наблюдались ранее в частицах вулканического или техногенного происхождения. Такие микросферы могут быть использованы в качестве стратиграфического репера импактного события, в том числе как диагностический признак кометного вещества и продуктов его преобразования. Возникающие при взрыве микро- и наноструктуры могут обладать принципиально новыми свойствами и представлять интерес для разработки материалов с новыми свойствами, что важно для работ в области нанотехнологий. Обнаружение тонких пленок железа и никеля на частицах земного происхождения может быть использовано в качестве диагностического признака кометного вещества в случаях взрыва метеороида с разрушением в атмосфере или на поверхности.

Ключевые слова: Чулымское космическое тело, микроструктура и состав, микросферы, железосодержащие алюмосиликатные микросферы

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН

Microscopic traces of the Chulyum bolide, fall 1984

Vladimir A. Tselmovich¹, Vasily G. Shelmin², Larisa P. Maxe³

¹Borok Geophysical Observatory of Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Borok village, Yaroslavl region 152742, Russia, e-mail: tselm@mail.ru

²Ecomonitor LLC, 3/7 Mir st., Kislovka village, Tomsk, Tomsk region 634050, Russia, e-mail: chulyymb@mail.ru

³ALC “STRIM”, 17 Gabrovskaya st., Mogilev 212029, Republic of Belarus, e-mail: larissa_maxe@rambler.ru

Received 23.01.2025, accepted 07.03.2025

Research subject. The Chulyumsky bolide, the fall of 1984. **Aim.** Identification of diagnostic signs of cometary origin particles extracted from the “trace” of the Chulyum cosmic body, analysis of data for its classification by type to a fragment of the comet nucleus. **Materials and methods.** Peat columns selected at three points along the flight path of the Chulyum

Для цитирования: Цельмович В.А., Шельмин В.Г., Максе Л.П. (2025) Микроскопические следы Чулымского болида, падение 1984 года. *Литосфера*, 25(4), 961-976. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-4-961-976>. EDN: RTCHEE

For citation: Tselmovich V.A., Shelmin V.G., Maxe L.P. (2025) Microscopic traces of the Chulyum bolide, fall 1984. *Lithosphere (Russia)*, 25(4), 961-976. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-4-961-976>. EDN: RTCHEE

cosmic body were studied. An optical microscope “Olympus BX 51M” and a scanning electron microscope “Tescan Vega II” with a prefix for energy-dispersive quantitative microanalysis “Drycool” were used. *Results.* The cometary nature of Chulyum cosmic body was accepted by the authors as a working hypothesis, according to which a ground-based search was conducted for “traces” of an exploding bolide – a fragment of a comet – in the form of microscopic cosmic particles. The authors consider the version of a thermal explosion of Chulyum cosmic body during braking in dense layers of the atmosphere to be the most probable. An initiative expedition was conducted to collect samples containing suspected “traces” of cometary matter. The particles extracted from the samples taken at three points of the Chulyum cosmic body trace near Minayevka were studied. The authors attributed some of the detected particles to the substance of the bolide destroyed by the explosion, based on the working hypothesis that the Chulyum cosmic body is a fragment of a comet. *Conclusions.* The particles found in samples from three sampling points differ in microstructure, which may reflect the interaction of cosmogenic matter with terrestrial matter at different stages of the bolide's flight. Among the particles isolated from the “trace” of the Chulyum cosmic body, iron-containing aluminosilicate microspheres with a unique fine-fiber microstructure turning into nanostructural features that have not been observed previously in particles of volcanic or technogenic origin were identified. Such microspheres can be used as a stratigraphic reference for an impact event, including as a diagnostic feature of cometary matter and its transformation products. Micro- and nanostructures arising during the explosion may have fundamentally new properties and be of interest for the development of materials with new properties, which is important for work in the field of nanotechnology. The detection of thin films of Fe and Ni on particles of terrestrial origin can be used as a diagnostic feature of cometary material in cases of meteoroid explosion with destruction in the atmosphere or on the surface.

Keywords: *Chulyum cosmic body, microstructure and composition, microspheres, iron-containing aluminosilicate microspheres*

Funding information

The work was performed within the framework of the state assignment of the IPE RAS

ВВЕДЕНИЕ

Исследования астероидов, комет, метеороидов обусловлены не чисто научным интересом, а ясным осознанием опасности этих объектов для человечества.

Чулымский болид вошел в земную атмосферу вечером 26 февраля 1984 г. и взорвался на большой высоте (около 100 км) в 120 км к северу от Томска, в районе р. Чулым – правого притока р. Обь (на границе Красноярского края и Томской области). Болид разрушился в атмосфере, образуя метеоритные рои. Он наблюдался около 10 с как чрезвычайно яркий искрящийся объект, его полет сопровождался ударной звуковой волной и микроземлетрясением, которое зарегистрировано региональными станциями Единой сети сейсмических наблюдений. По оценкам специалистов, мощность взрыва более 11 кило тонн в тротиловом эквиваленте. Направление полета Чулымского космического тела (ЧКТ) – с востока на запад. По свидетельству очевидцев, болид вспыхивал на высоте и от него отделялись небольшие фрагменты до самого момента взрыва, разделившего его на три части. На земле по траектории пролета ЧКТ энтузиастами собраны массивные образцы, предположительно метеориты, но лабораторное исследование не выявило их космического происхождения (Цельмович и др., 2023). Тогда было решено попытаться обнаружить микроскопические частицы – пыль в “следе” взорвавшегося болида.

Частицы космической пыли (КП) – ценный источник информации для изучения и понимания

строения Вселенной, что обуславливает постоянную актуальность ее исследования. Образцы КП являются крупнейшим по массе источником метеоритных и кометных материалов. Идентификация наземных (ископаемых) следов потоков КП не простая, но решаемая задача (Цельмович, 2023). Особенно важно изучать характеристические микро-структуры КП для выявления диагностических признаков происхождения КП в пробах с места зафиксированного события, к ним относится и ЧКТ (Цельмович и др., 2023).

Исследование ископаемой КП имеет особое значение в связи с необходимостью изучения палеособытий в истории Земли и прогнозирования возможных катастроф. Так, группа исследователей кафедры астрономии Бостонского университета под руководством Джесс Миллер провела исследование, которое показало, что Земля и вся Солнечная система могли пройти через два плотных межзвездных облака 7 млн лет назад (Miller et al., 2024). Это событие, как предполагается, привело к сжатию гелиосферы, и Земля оказалась под воздействием межзвездной среды, что привело к катастрофическим изменениям климата, поскольку мелкие частицы кометной пыли “выживают” при проникновении в атмосферу и попадают на поверхность. Для установления факта подобных палеособытий, а их в истории Земли было немало, важно правильно выделять и идентифицировать частицы КП на фоне сходных частиц техногенной и вулканической пыли. С учетом этого материалы, собранные в следе по траектории и на месте под

взрывом ЧКТ в воздухе, представляют особый информационный ресурс.

Микроскопическая пыль из космоса попадала на Землю на протяжении всей ее истории. Самые мелкие частицы могут находиться в атмосфере длительное время и оседают на поверхность Земли в течение нескольких недель. Внеземные частицы на земной поверхности незаметны для невооруженного глаза, но их можно собрать, отделить и идентифицировать по их характеристическим особенностям и свойствам. Исследования межпланетной пыли, собранной в стратосфере, позволили получить представление о природе кометных материалов (Brownlee, 1985) и их характере (частицы размером около 10 мкм замедляются на высотах от 100 км – ударное давление 0.02 кПа). Известно, что на Землю ежедневно падает в среднем 54 т межпланетного вещества (космической пыли) (Drolshagen et al., 2017). Не расплавившаяся в атмосфере КП часто состоит из большого количества мелких силикатных, сульфидных и органических компонентов, которые относятся к материалам ранней Солнечной системы. Фактически частицы КП – микропробы материала комет и астероидов, из которого сформировались планеты (Brownlee, 2016).

Изучение частиц КП позволяет открывать тайны досолнечной эпохи. Самое древнее из обнаруженного на Земле вещество найдено в космической пыли (Neck et al., 2020). Изучая включения в метеорите, ученые обнаружили частицы звездной пыли возрастом более 5 млрд лет. Некоторые хондриты, помимо протопланетной пыли, включают в себя предсолнечные зерна – частицы межзвездной пыли, которая содержалась в межзвездном газе еще до образования Солнца, единственные материальные свидетельства периода, предшествовавшего Солнечной системе. Они обнаружены благодаря исследованиям КП. Изучение КП позволило узнать состав древней атмосферы Земли (Tomkins et al., 2016).

Сегодняшний уровень представлений о природе кометного вещества заметно пополнен новыми данными. Телескоп TESS обнаружил экзокометы возле звезды, удаленной от Земли на 65 световых лет (Zieba et al., 2019). Экзокометы – кометы возле удаленных звезд – оказались подобны кометам, вращающимся вокруг Солнца, что подтверждает правильность современных научных взглядов и теорий происхождения звезд и планет, комет и астероидов. Современные данные, полученные отдельными учеными и международными коллективами ученых разных стран, основанные на исследованиях комет автоматическими аппаратами и телескопами, размещенными на земле и в космосе, мы обобщили и анализировали для последующего применения при постановке и решении целевых задач работы. К ним относятся наземная микроскопическая диагностика кометного вещества, поиск

критериев его идентификации на основе изучения микрочастиц болидной – кометной – пыли из “следа” по траектории полета ЧКТ, отнесенных нами к частицам кометным потенциально.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

На начальном этапе объектами исследования стали каменные фрагменты, найденные и отнесенные к ЧКТ поисковиком В.Г. Шельминым, который предположил, что они имеют внеземное происхождение и предоставил их для изучения в ГО “Борок” ИФЗ РАН. При изучении этих образцов в лаборатории ГО “Борок” в них выявлено наличие следов доменного процесса, однако не обнаружены частицы, которые по происхождению можно было бы отнести к космогенным. Отмечено, что объекты, подобные предоставленным образцам и по составу, и по структуре, образуются во время крупных природных пожаров, в металлургических процессах, при горных взрывных работах, что вызывает научный интерес при поиске аналогов и моделей. Отметив многочисленные безуспешные попытки множества поисковиков найти массивные фрагменты ЧКТ, авторы сосредоточились на поисках микроскопических следов взрыва и падения.

Известные к настоящему времени места и следы падения космических объектов на поверхность Земли исследованы, обнаружение и анализ новых фрагментов и продуктов деструкции метеороидов – задача перманентная, информация о них востребована и пополняет целевые базы данных. В массиве данных о метеороидах заметно, что наименее изучены вещество комет, следы распада и выпадения их частиц на поверхность Земли.

Для анализа предполагаемого состояния ЧКТ до вхождения в атмосферу Земли, еще на этапе его формирования, мы выделили общее и принципиальные различия между “новорожденными” будущими астероидами и кометами и их уже “зрелым” состоянием.

Начальной стадией планетообразования обычно считают образование неоднородностей – сгущений (Шмидт, 1949). В пылевом протопланетном диске у формирующегося Солнца частицы льда и пыли под действием взрывной волны, излучений и гравитации образовывали небольшие скопления – сгустки. При развитии и укрупнении сгустков постепенно формировались планетезимали – зародыши будущих планет, комет и астероидов. В условиях космических столкновений минералы в сгустках постепенно “вызревали” (уплотнялись, кристаллизовались), под действием гравитации они сближались, образовывая планетезимали. “Новорожденные” планетезимали обретали свою “жизнь” и свою историю, включающую в себя рост до состояния планеты или до столкновения с разрушением и превращением в рой астерои-

дов. Современная “жизнь” астероидов протекает в столкновениях в поясе между орбитами Марса и Юпитера, некоторые из них со временем становятся метеорами или метеоритами в атмосферах планет. Образование комет происходит по другому пути и имеет некоторые принципиальные отличия. Исследованиями выявлено, что комета Чурюмова–Герасименко – это результат гравитационного коллапса облака из минеральной и ледяной пыли (Blum et al., 2017).

Некоторые теории происхождения предполагают, что в разряд комет отдельные начальные сгустки переводит гравитация массивных объектов Солнечной системы, и она же заставляет их двигаться по вытянутым орбитам эллиптическим, гиперболическим или параболическим. По космогонической гипотезе О.Ю. Шмидта (1949), в пространстве у звезды происходило активное формирование пылевых частиц и их уплотнение в ледяные глыбы, которые были выброшены на окраины Солнечной системы, что привело к образованию сферического облака Оорта. В Солнечной системе, наряду с облаком Оорта, имеется пояс, состоящий из астероидов и комет. Периферия Солнечной системы насыщена ядрами комет: вулканы планет-гигантов периодически выбрасывают в межпланетное пространство ледяные глыбы, которые могут становиться кометами, как и глыбы льда от бомбардировки астероидами ледяных спутников планет. Во всех случаях конечным результатом становится ледяной каркас, включающий в себя собранное космическое вещество от единичных молекул до их агрегатов, металлических и минеральных частиц, простых линейных и сложных циклических углеводородов.

Сгустки, содержащие ледяную пыль и лед – будущие кометы, хорошо адсорбируют из окружающего пространства и накапливают простые органические соединения, которые в ходе эволюции комет преобразуются в сложные. Накапливающееся на поверхности комет вещество при действии ультрафиолета служит субстратом для формирования простых и затем более сложных органических молекул (Simonia, 2011).

Обобщая, выделим следующее: для формирования комет характерен быстрый коллапс облака, включающего ледяную пыль, либо выброс ледяного осколка как будущего ядра кометы, этап “вызревания” минералов отсутствует, но периодически складываются условия для протекания химических процессов под воздействием излучений.

Ученые сделали предположение (Weissman et al., 2020), что, если бы комета Чурюмова–Герасименко родилась в сильных столкновениях (например, из обломков планетезималей), то ее вещество было бы неоднородным и частично переплавленным, состоящим из глыб разного минерального состава. Вещество ядер комет, как пра-

вило, не подвергается сильным ударным столкновениям, что типично для астероидов. До встречи с Землей астероиды и кометы, включая их кому и ядро, имеют различную историю развития. Теоретические расчеты и наблюдения показывают, что в итоге кометы разрушаются, их ядра эволюционируют в неактивные объекты, похожие на астероиды (Weissman et al., 2020). Итог эволюции комет и астероидов – образование наночастиц межпланетной КП.

В качестве вероятной версии взрыва ЧКТ (рабочей гипотезы) авторы рассматривают тепловой взрыв при торможении в плотных слоях атмосферы. За время полета в атмосфере Земли поверхность ядра или фрагмента кометы подвергается абляции, но абляция не успевает нагреть и расплавить внутреннюю часть вплоть до фазы торможения в плотных нижних слоях атмосферы. Снижение скорости при торможении объекта создает условия для протекания высокотемпературных химических процессов между компонентами ядра объекта (в нашем случае – ЧКТ), раскаляются частицы металлов и минералов, лед и вода переходят в пар. Контакт даже микроколичества раскаленного железа и паров воды запускает реакцию, при которой выделяется газообразный водород, который при слишком высокой скорости метеороида уносится потоком. Взрыв может произойти лишь на этапе торможения в нижних слоях атмосферы, где водород может “сконцентрироваться” в полостях и порах и где кислорода достаточно для взрыва гремучего газа – смеси водорода и кислорода (2:1). Твердофазные продукты разрушения, вызванные тепловым взрывом, – окислы железа, застывшие капли расплавов, напоминающие шлаки, пузырчатые и пористые минеральные образования. Следовательно, в выпавших на поверхность продуктах взрыва ЧКТ, если он был фрагментом ядра кометы, можно найти шлакоподобные образования и частицы, нитевидные, витые, пористые и пузырчатые структуры в частицах макро- и микроуровня.

В связи с наличием в окружающей среде, а часто и в планшетах поиска КП, множества микрочастиц земного природного и техногенного происхождения, во многом структурно и морфологически аналогичных уже изученным частицам КП (банка данных КП), первая и особая задача в работе – поиск локаций и правильный отбор проб. Следующая важная задача представляет собой выделение из отобранных проб целевых объектов исследования – частиц КП, относящихся к событию ЧКТ. Итоговая задача – изучение микроструктуры и состава выделенных частиц КП. Цель работы заключается в выявлении характеристических особенностей – диагностических признаков частиц КП кометного происхождения – и применении их к трактовке происхождения ЧКТ.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Благодаря новым находкам фрагментов и следов падения метеороидов, обнаружению продуктов их деструкции в полете или при взрыве продолжается изучение и пополнение баз данных о потоках КП, в особенности кометной КП, с учетом этого авторы рассматривают кометную версию происхождения ЧКТ по аналогии с Учурским космическим телом (Tselmovich et al., 2023).

Макрофрагментов ЧКТ в районе его надземного взрыва не найдено. С учетом этого организован отбор проб в целях поиска микроскопических “остатков” ЧКТ. Инициативной экспедицией пробы для исследований отобраны в торфяниках в районе взрыва ЧКТ. Часть обнаруженных в пробах торфа частиц авторы отнесли к веществу потенциально кометного происхождения. Среди частиц, выделенных из следа ЧКТ, обнаружены железосодержащие алюмосиликатные микросферы с уникальной микроструктурой, переходящей в наноструктурные особенности, которые не встречались ни в вулканических (Коробейников и др., 1990), ни в техногенных выбросах. Благодаря этому они могут быть использованы в качестве стратиграфического репера импактного события.

Образцы различных каменных тел, найденные и отнесенные к ЧКТ поисковиком В.Г. Шельминым, представлены на рис. 1.

Состав минералов, предоставленных на исследование каменных тел, изучали на растровом электронном микроскопе Tescan Vega II с системой энергодисперсионного количественного микроанализа INCA Energy 350 (Oxford Instruments, Великобритания, спектрометр Drycool) в ГО “Борок”

ИФЗ РАН (п. Борок, Ярославская область). Условия исследования: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 0.1–0.4 нА, размер зонда <0.1 мкм, время измерения 50 с (“живое” время), ошибка анализа на сумму достигает 2–4 мас. % в зависимости от качества поверхности образца и особенностей его состава.

В Томский университет образцы были отправлены раньше, чем в Борок, и их анализировали на приборах аналогичного типа (СЭМ с приставкой для ЭДС). Результаты исследования получены сходные, однако в Томске не предположили, что в образцах прослеживаются различные фазы доменного процесса. Этот вывод сделан в ГО “Борок” ИФЗ РАН (Цельмович и др., 2023; Цельмович, Шельмин, 2023).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования отбор проб осуществляли в виде колонки, и первой стала точка с координатами 57°49'03.62" N, 85°55'41.21" E. Частицы КП из точки 1 представлены смесью магнетитовых (*Mt*) и алюмосиликатных (*AlSi*) микросфер, включая каркасные, встречаются частицы чешуйчатого железа, которые являются фоновой КП, присутствуют частицы терригенного *Mt*. Точка 1 находится в 40 км к северу от точек 2 и 3, в которых также были обнаружены частицы, предположительно, кометного происхождения. При предполагаемой траектории полета Чулымского болида с востока на запад ширина воздействия взрыва превышает 40 км.

Результаты исследования химического состава и морфологии частиц из точки 2 (57°29'27.9" N, 85°39'16.86" E) и точки 3 (57°27'10.09" N,



Рис. 1. Собранные в районе падения ЧКТ фрагменты со следами доменного процесса.

Fig. 1. Fragments collected in the area of the ChCB fall, with traces of the blast furnace process.

86°00'09.11" E) дополнили базу данных, начатую ранее исследованиями в точке 1 (Цельмович и др., 2023, 2024). Анализировали микроструктуру и состав частиц, выделенных из всех трех точек в сравнении с ранее полученными данными исследования частиц, выделенных из проб осадочных пород (торф, трепел). При рассмотрении и анализе особенностей микроструктуры и морфологии частиц, выделенных из проб (в точке 2), изначально предположили, что частицы образовались в атмосфере при взрыве и/или высокотемпературной абляции тела сложного композитного состава, включающего лед, не исключали возможность падения частиц на поверхность (Войцеховский, 1990; Guilbert-Le-routre et al., 2016).

Для сравнения микросфер и частиц иных форм по морфологии, структуре и составу в работе использовали данные и результаты сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), полученные авторами ранее при исследовании частиц космической и техногенной пыли (Цельмович и др., 2019; Цельмович, Максе, 2022). В использованных для сравнения извлечениях – частицах КП из трепела месторождения Стальное (потенциально включающее палеократер, Хотимский район, Беларусь) – содержатся микровключения: множество частиц железа в форме *Mt*-микросфер, чешуек, стружек, лент, но частицы с никелем обнаруживаются редко (Цельмович, Максе, 2022).

Проведенное в работе исследование выявило, что в извлечениях из проб, отобранных в точках 1–3 в “следе” ЧКТ, действительно имеются частицы, которые отличаются особой морфологией, микроструктурой, имеют необычный сложный состав. Найденные в разных точках отбора проб частицы различаются, и эти различия, по нашему мнению, отражают различные стадии взаимодействия кометного вещества с земным веществом атмосферы и поверхности. Среди частиц, выделенных из проб по “следу” ЧКТ, обнаружены железосодержащие алюмосиликатные микросферы с уникальной микроструктурой, переходящей в наноструктурные особенности, которые не наблюдаются при изучении частиц, образующихся при вулканических и техногенных процессах (Кириллова, 2012; Tosheva et al., 2012; Mintova et al., 2015). Некоторые из частиц идентифицированы как железистые алюмосиликаты, наличие которых отмечалось ранее. Наряду с обогащенными магнием кристаллическими силикатами в минеральной фракции кометных ядер найдены кристаллические силикаты с высоким содержанием железа, у которых значение $Fe/(Fe + Mg)$ варьируется в пределах от 0.1 до хондритового значения ≈ 0.5 (Zolensky и др., 2008). Вопрос об образовании этих фаз остается до сих пор открытым, но отдаленным техногенным аналогом могут служить структуры, синтезируемые как катализаторы (Ханхасаева и др., 2003; Смирнова и

др., 2023). Эффективные и недорогие сорбенты и катализаторы востребованы в промышленности и хозяйственной деятельности. Найденные нами наноструктуры железистых алюмосиликатов кометного происхождения могут быть воспроизведены в технических целях как катализаторы, целевые сорбенты и др.

В работе авторы не ставили задачу и цель обнаружить “остатки” кометного льда. Учитывая сведения о структуре и составе ядер комет (Дорофеева, 2020), а также свидетельства очевидцев взрыва ЧКТ об искрении в полете и после взрыва, согласно принятой рабочей гипотезе, мы считаем, что причиной разрушения ЧКТ в нижних слоях был тепловой взрыв при торможении. Взрыв ЧКТ (свидетелем которого был и В.Г. Шельмин) вызвал разрушение тела болида и не очень большой разлет фрагментов, падение которых сопровождалось вспышками, искрением и горением в нижних слоях атмосферы. Авторы предположили, что ЧКТ могло оставить “следы” в форме нано- и микрочастиц КП, осевших на поверхность снежного (под ним – растительного) покрова, необычных фрагментов теплового повреждения вещества.

При анализе результатов исследования СЭМ изображений морфологии и состава выделенных частиц КП исходили из предположения о неоднородном прогреве ЧКТ и, соответственно, абляции с его поверхности вещества, уже прошедшего некоторую высокоскоростную и высокотемпературную “обработку”. На основании этой “рабочей гипотезы” поиск различий проводили с учетом предполагаемых изменений исходного вещества ЧКТ при абляции, взрыве и разлете его фрагментов. Взрыв привел к образованию фрагментов ЧКТ, которые могли сохранить также часть исходного вещества ядра. Аналогии преобразований, частиц, морфологии искали в “прототипах” промышленного производства.

Следуя запросам различных отраслей промышленности, а также медицины, экологии и других областей, разрабатываются технологии получения нано- и микросфер с различными целевыми свойствами. К ним относятся микросферы с заданной иерархической структурой и морфологией. Магнетитовые микросферы получают плазмодинамическим синтезом, однако очень похожие по структуре и морфологии образуются при сварке и обработке сталей, при абляции и взрыве в атмосфере объектов, содержащих железо. Промышленный синтез абиогенных алюмосиликатных микросфер осуществляют в комплексе физико-химических процессов, конкретные параметры которых задаются программами и контролируются автоматизированными системами управления. Природные, нетехногенные алюмосиликатные микросферы образуются в процессе плазменной абляции или взрыве метеороида в атмосфере. Это явление неконтролируемое

и многофакторное, однако аналогичные быстропротекающие промышленные процессы уже используются в целях получения алюмосиликатных микросфер различного назначения. В соответствии с поставленными задачами к процессам-аналогам относим следующие: высокоскоростной нагрев, плавление и фазовые превращения в потоке плазмы, пузырьковое кипение, химические реакции, раздув (газами), диффузия через пористые слои. Накопленный технологический опыт может быть полезен для восстановления условий образования частиц кометного происхождения. С другой стороны, сделанные нами находки наноструктур, не описанных в известных технологических процессах, могут инициировать разработку новых процессов.

Частицы межпланетной пыли входят в атмосферу Земли на высоких скоростях, однако мы учитывали, что выделенные из проб частицы КП образовались в результате взрыва и абляции фрагментов разного размера на относительно небольшой высоте (5–2 км) в кислородной среде, они резко охлаждались и погрузились в снег, лед или воду. При взрыве крупные фрагменты и частицы ЧКТ могли получить начальный импульс и дополнительно – момент вращения. В связи с этим микрочастицы ЧКТ претерпели физико-химические и морфологические преобразования, становясь частицами КП к моменту достижения поверхности земли. На эти “рождающиеся” частицы КП действовали разнонаправленные силы: ударная волна снаружи, давление паров изнутри, крутящий момент.

При анализе морфологии частиц КП учитывали, что в начальный момент после взрыва на них подействовала ударная волна, вызывая нагрев, вскипание или даже возгонку, диффузию, раздув, возможно, наматывание легкоплавких составляющих при вращении частиц. Во время полета–падения и затем в слоях мхов частицы КП подвергались атмосферному воздействию газов, паров воды, снега, льда. В качестве диагностических признаков кометного происхождения частиц авторы анализировали вероятные следы высокотемпературных и взрывных процессов, поверхностей осаждения–“напыления”, аналоги которых на Земле не встречались.

Структуры, связанные с нанесением вещества метеорита на терригенное вещество, обнаружены нами ранее в астроблеме Цэнхэр (Монголия) (Цельмович, 2012а) (рис. 2а) и в структурах, найденных на месте падения Тунгусского космического тела (ТКТ) (рис. 2б) (Цельмович, 2012б). Подобные структуры свидетельствуют о быстропротекающем процессе, связанном с взрывным нанесением горячего космогенного вещества в виде расплавов (газов) на холодные земные частицы. Сходные по морфологии цилиндры из никеля найдены в катастрофном слое торфяника Тундра (Кемеровская обл.) (рис. 2в; (Цельмович и др., 2019)), а частицы

никеля – в песчаниках Carolina Bays, импакт 12 800 лет назад (рис. 2г, (Цельмович и др., 2018)). С учетом уникальных свойств никеля, его сверхпластичности можно говорить о сходстве процессов фиксации космогенного никеля на земных структурах, что свидетельствует о подобии процессов, происходящих при падении крупных космических тел при взаимодействии их нагретого вещества с земным веществом. Версию о кометном происхождении металлических пленок подтверждают недавние исследования кометного вещества, показавшие наличие паров атомарного никеля и железа в составе многих комет (Guzik, Drahus, 2021; Manfroid et al., 2021). Это позволяет предположить, что находки пленок никеля и железа имеют отношение к кометному веществу и могут подтвердить предположение о кометном происхождении ТКТ и ЧКТ. Однако механизм образования таких пленок из обнаруженных паров пока не выяснен и не изучен.

На рис. 3 и 4 представлены данные СЭМ, отражающие результаты исследования частиц, извлеченных из торфа (точки 1 и 2) по следу рассеяния ЧКТ, демонстрирующие особенности состава и морфологии, по которым они могут быть отнесены к частицам кометного происхождения.

На рис. 3 показана частица земного кварца со следами эрозии и внедренными (имплантированными) частицами железа. Под имплантацией мы понимаем внедрение высокоскоростных космогенных частиц (ударников) в другую частицу (наковальню), земного или космогенного происхождения. Как правило, частица-ударник имеет значительно меньший размер по сравнению с частицей-наковальней и частично внедрена в наковальню в момент удара. На рис. 4 представлена пленка гематита (отмечена стрелками), возникшая в результате взрывного и термического воздействия, толщиной 1 мкм.

На рис. 5–7 показаны пленочные структуры взрывного происхождения – “нашлепки”, тонкие пленки железа, наноразмерные структуры распада в алюмосиликатах. На рис. 8 представлена структура с никелевой пленкой космогенного происхождения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании комплекса особенностей и отличий микрочастиц, обнаруженных в пробах из “следа” ЧКТ, мы считаем, что ЧКТ, скорее всего, было фрагментом кометы, имело твердофазное ядро, оболочку и пылевое сопровождение. Высокоскоростное движение ЧКТ в атмосфере сопровождалось абляцией, которая снижала его начальную массу, вызывала нагрев, плавление, торможение и растрескивание создали условия для протекания химических процессов и взрыва. Возможно проведение аналогий кометной гипотезы происхождения ЧКТ с кометной гипоте-

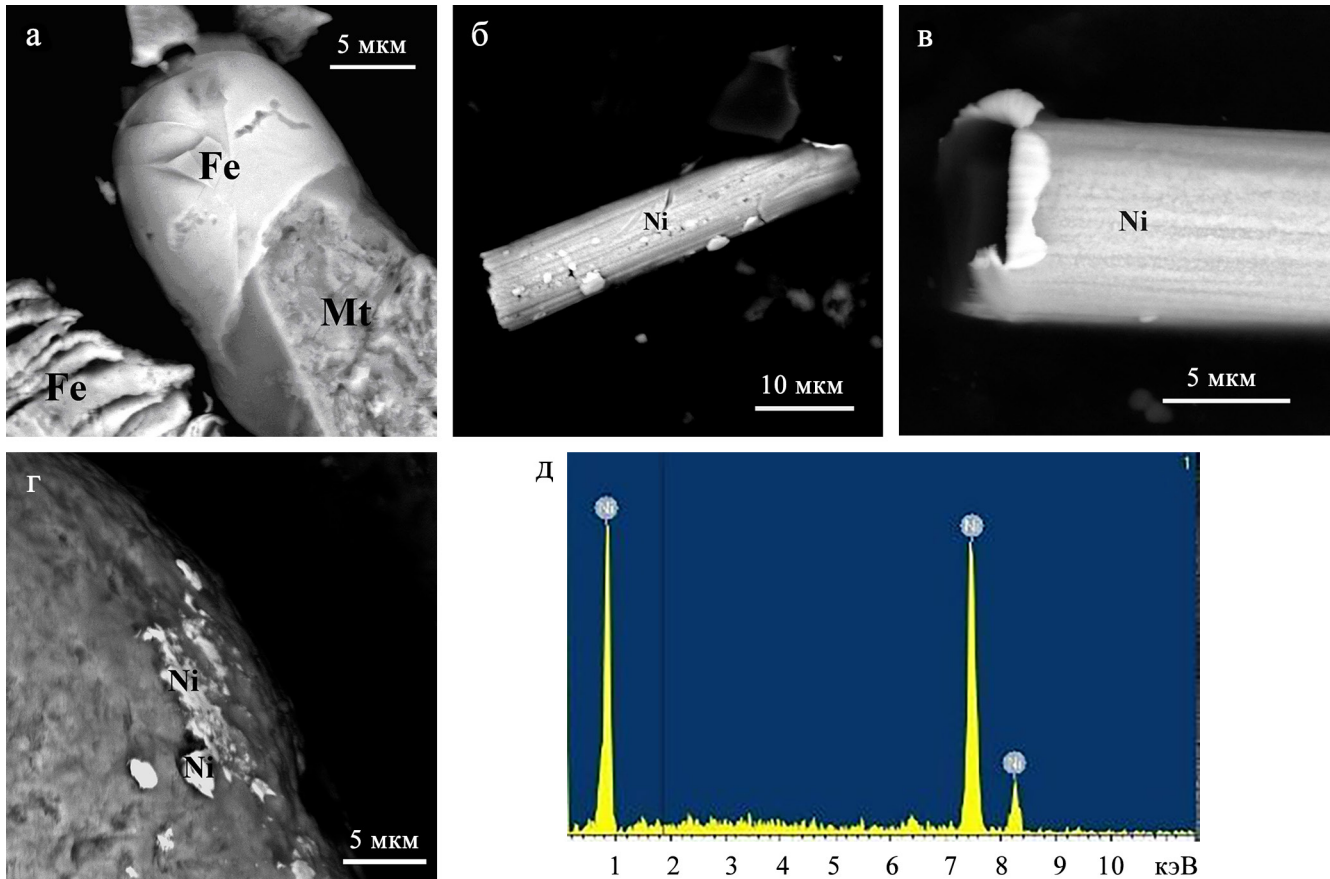


Рис. 2. Структуры, связанные с нанесением вещества метеорита на терригенное вещество.

а – железо (сверху), наплавленное на *Mt*, астроблема Цэнхэр (Цельмович, 2012а); б – трубка из никеля, Тунгусский заповедник; в – никелевая трубка, торфяник Тундра, импакт 5000 лет назад (Цельмович и др., 2019); г – никелевая пленка, феномен Carolina Bays – импакт 12 800 лет назад (Цельмович и др., 2018); д – спектр никелевой трубки, Тунгусский заповедник (Цельмович, 2012б).

Fig. 2. Structures associated with the deposition of meteorite material on terrigenous material.

а – Fe (top) deposited on *Mt*, Tsenkher astrobleme (Tsel'movich, 2012a); б – Ni pipe, Tunguska Reserve; в – Ni pipe, Tundra peatland, impact 5000 years ago (Tsel'movich et al., 2019); г – Ni film, Carolina Bays phenomenon – impact 12800 years ago (Tsel'movich et al., 2018); д – spectrum of a nickel pipe, Tunguska Reserve (Tsel'movich, 2012b).

зой происхождения Тунгусского космического тела (Коробейников и др., 1990).

Исследование остаточной намагниченности насыщения *I_{rs}* проб, послойно отобранных из торфяного разреза, не выявило магнитных аномалий в виде всплесков *I_{rs}* или иных (Цельмович и др., 2024). Этот факт свидетельствует о низкой плотности вещества ЧКТ и небольшого содержания в нем магнитных частиц, что также косвенно указывает на кометную природу ЧКТ.

Атмосфера Земли служит естественным барьером, задерживая космический “мусор”, в том числе и кометный – разреженное вещество хвоста, включающее, кроме нано- и микрочастиц, ионы и атомы металлов (присутствующие в низких концентрациях). Констатируя факт не техногенного, а естественного попадания (нанесения) “космического” нике-

ля и железа в виде пленок и прерывистых покрытий на поверхности земных частиц, мы провели обзор и анализ современных способов и технологий “никелирования” поверхностей. Наиболее соответствующим размерному уровню частиц, при наличии множества способов электродуговой металлизации, холодного газодинамического и газотермического, газопламенного и плазменного напыления, представляется способ, не требующий больших объемов и количества изучаемого вещества, сложного оборудования, реализуемый и в природной среде при соответствующих условиях. Наиболее адекватными, не противоречащими законам физики и химии причинами образования пленок никеля и/или железа на поверхности частиц земных минералов могут быть ударно-волновые процессы, детонация и химическая конденсация. Промышленная техно-

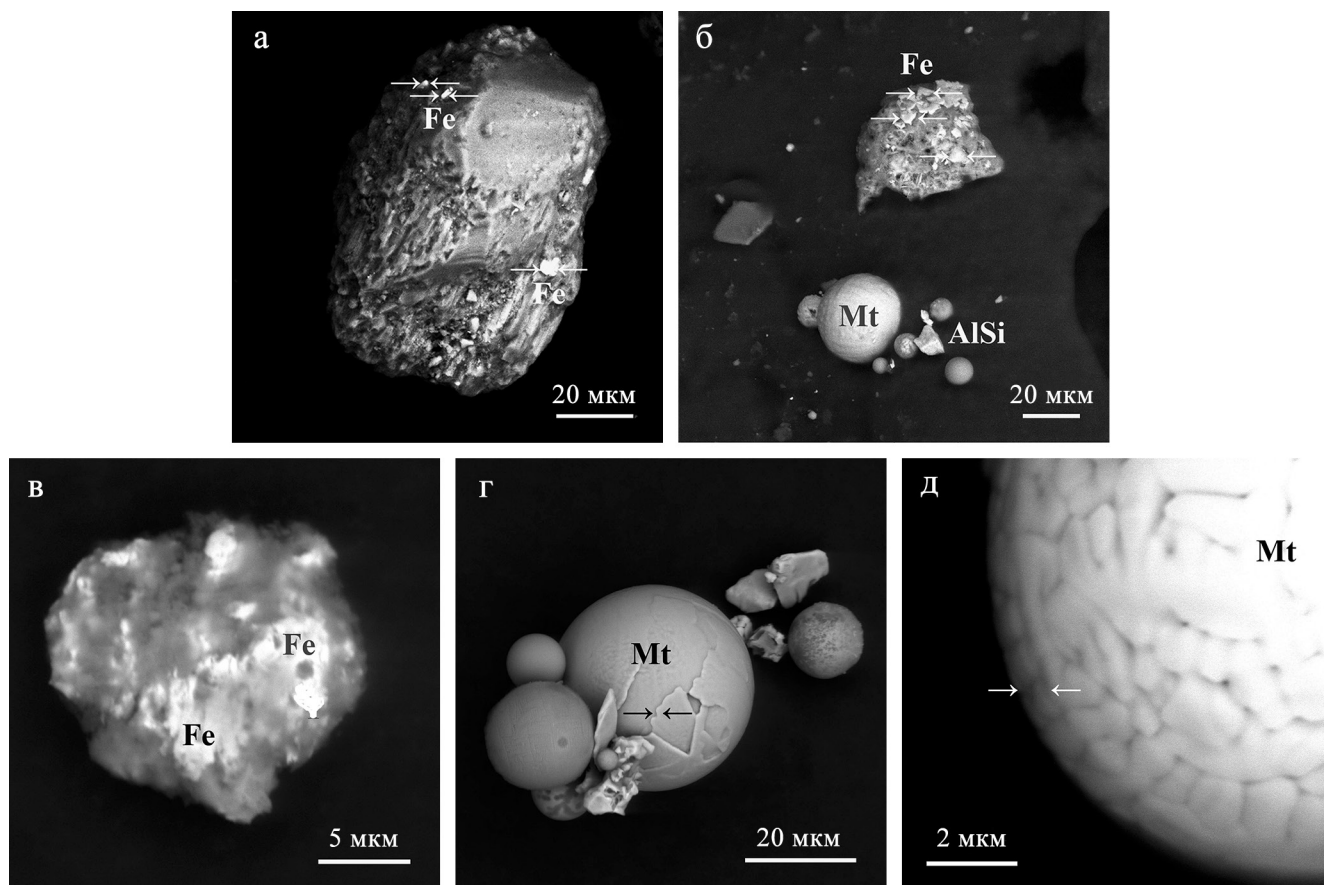


Рис. 3. Результат воздействия космогенного вещества и взрыва на терригенное вещество.

а – частица земного кварца со следами эрозии и внедренными частицами железа; б – пленки железа на земной частице; в – пленки железа на земной частице; г – результат действия взрыва на микросферу, приведший к срыву поверхностных слоев центральной микросферы толщиной 0.5–1.0 мкм; д – пленка гематита (отмечена стрелками), возникающая в результате взрывного воздействия, толщиной 1 мкм; г – типичный спектр железосодержащего алюмосиликата.

Fig. 3. The result of the impact of cosmogenic matter and explosion on terrigenous matter.

а – a particle of terrestrial quartz with traces of erosion and embedded Fe particles; б – Fe films on a terrestrial particle; в – Fe films on a terrestrial particle; г – the result of the action of an explosion on a microsphere, which led to the breakdown of the surface layers of the central microsphere with a thickness of 0.5–1.0 μm; д – a hematite film (marked with arrows), formed as a result of the explosive impact, with a thickness of 1 μm.

логия нанесения тончайших металлических покрытий детонационным напылением предусматривает нагрев напыляемого порошка, который с большим ускорением наносится на поверхность с помощью продуктов детонации, и осуществляется оно циклически – многократными последовательными циклами работы детонационной пушки. Заводское детонационное напыление применяют для упрочнения деталей различного назначения, в том числе работающих в концентрированных растворах щелочей. Методом детонационного напыления наносят покрытия из порошков различных металлов, сплавов, оксидов, тугоплавких соединений и их различных композиций.

В условиях столкновения кометного вещества с земным могут реализовываться самые различные параметры взрыва, приводящие к формирова-

нию различных микроструктур, в том числе и капель расплава. Показано (Ивочкин и др., 2020), что характер протекания фрагментации (взрывная или спокойная) и степень дробления капель, формы и размеры осколков определяются главным образом состоянием (окисленностью) поверхности расплава и его температурой. Минимальные радиусы образующихся частиц при тонкой фрагментации не превышали нескольких микрометров, а скорость их разлета при взрывном разрушении капли может достигать десятков метров в секунду.

Сравнительный визуальный анализ СЭМ изображения пленки железа, осажденного на негладкой осколочной частице, указывает на качественное отличие этой пленки от пленок металлов, получаемых методами магнетронного или ионно-плазменного напыления. Если при рассмотрении исследу-

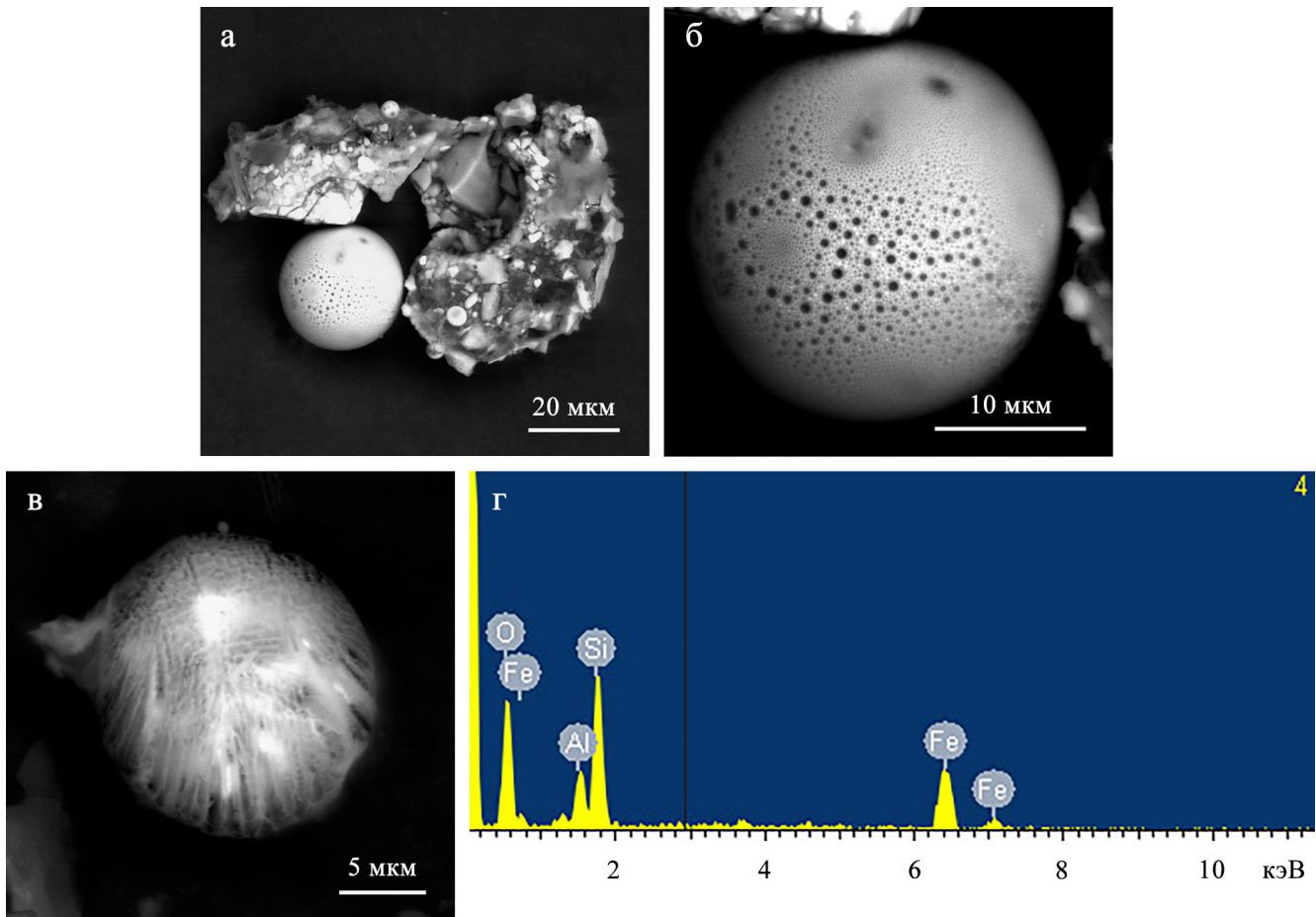


Рис. 4. Микроструктуры железосодержащих алюмосиликатных микросфер кометного происхождения.

а – железосодержащая алюмосиликатная микросфера, предположительно, кометная частица с наноразмерными выделениями магнетита, внедрившаяся в земную (вмятина выше и правее); б – микросфера с наноструктурами при большем увеличении; в – результат действия на железоалюмосиликатную частицу взрыва, приведшего к образованию тонковолокнистой наноструктуры; г – типичный спектр железосодержащего алюмосиликата.

Fig. 4. Microstructures of iron-containing aluminosilicate microspheres of cometary origin.

а – iron-containing aluminosilicate microspheres, presumably a cometary particle with nanosized magnetite deposits, embedded in the Earth's (dent above and to the right); б – microsphere with nanostructures at higher magnification; в – the result of the action of an explosion on an iron-aluminum-silicate particle, which led to the formation of a fine-fibrous nanostructure; г – typical spectrum of iron-containing aluminosilicate.

дуремых частиц КП принять вариант однократного детонационного воздействия – напыления, то пленочное покрытие на частицах может быть не только из железа и никеля, но и других металлов.

Мы исключаем вариант химического пути образования пленок никеля и/или железа на анализируемых частицах, так как при химическом осаждении раствор проникает до внутренних полостей и, кроме того, такое покрытие будет содержать другие элементы (например, фосфор). Для детонационного покрытия возможны разрывы сплошности пленки на неровной поверхности (не сплошной или неоднородной) (см. рис. 2б, 5б).

На данном этапе не предложен механизм образования пленок никеля и/или железа непосред-

ственно при взаимодействии с земным веществом обнаруженных P. Guzik и J. Manfroid облаков атомарного железа и никеля (Guzik, Drahus, 2021; Manfroid et al., 2021). Отмечая важность открытия ими облаков никеля и железа при обсуждении природы обнаруженных нами тонких пленок (микронного размера) железа и никеля на частицах земного происхождения, мы считаем, что находки пленок никеля и железа могут быть использованы в качестве диагностического признака кометного вещества и без обсуждения и доказательства механизма их образования из паров. Нами показано, что пленки могут образовываться в результате взрыва метеороида с разрушением в атмосфере или на поверхности.

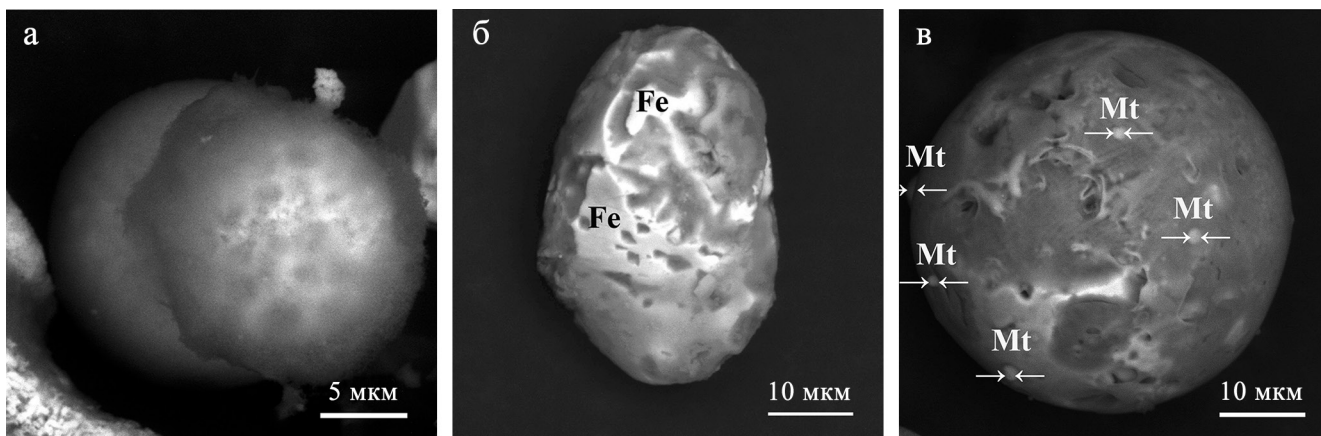


Рис. 5. Пленочные структуры взрывного происхождения.

а – образование – “нашлепка” на алюмосиликатную частицу; б – пленки самородного железа на алюмосиликатной частице; в – железистые пленки на алюмосиликатной частице и прилипшие магнетитовые наносферы (отмечены стрелками).

Fig. 5. Film structures of explosive origin.

а – “slap” formation on an aluminosilicate particle; б – native iron films on an aluminosilicate particle; в – ferrous films on an aluminosilicate particle and adhered magnetite nanospheres (marked with arrows).

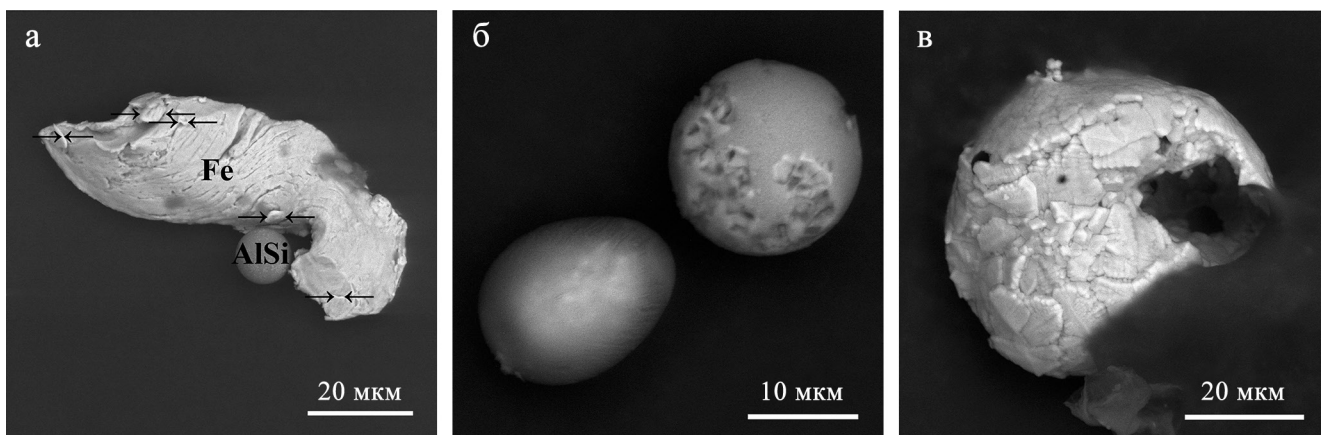


Рис. 6. Специфические микроструктуры, способные образоваться при взрыве кометы.

а – чешуйчатое науглероженное железо с тонкими частицами, внедрившимися при взрыве, отмечены стрелками; б – каплевидный алюмосиликат со структурами наноразмерного распада слева и алюмосиликат с пленкой справа; в – крупные кристаллиты *Mt*, сместившиеся при взрывном воздействии.

Fig. 6. Specific microstructures that can form during a comet explosion.

а – flaky carbonized iron with fine particles embedded during the explosion, marked with arrows; б – drop-shaped aluminosilicate with nanoscale decay structures on the left and aluminosilicate with a film on the right; в – large *Mt* crystallites displaced by the explosive impact.

Ранее в серии работ была показана возможность использования магнитных минералов в диагностике метеоритного вещества (Печерский и др., 2012, 2015, 2017). Полученные нами результаты изучения микроструктуры и состава магнитных минералов с места падения ЧКТ дополняют эти находки наноструктурами магнетита (см. рис. 4а, б) и железоалюмосиликатными наноструктурами (см. рис. 4в), которые могут использоваться в диагностике кометного вещества.

Подобные находки, с учетом возможности каталитических реакций на обнаруженных наноструктурах, позволяют на основе экспериментальных предпосылок обсуждать гипотезу панспермии (Цыганков и др., 2015; Алексеев и др., 2024). Сделанные нами находки на месте падения ЧКТ “работают” в пользу высказанной ранее гипотезы (Napier et al., 2007) о том, что кометы – идеальные инкубаторы, в которых миллионы лет может протекать так называемая пребиотическая эволюция.

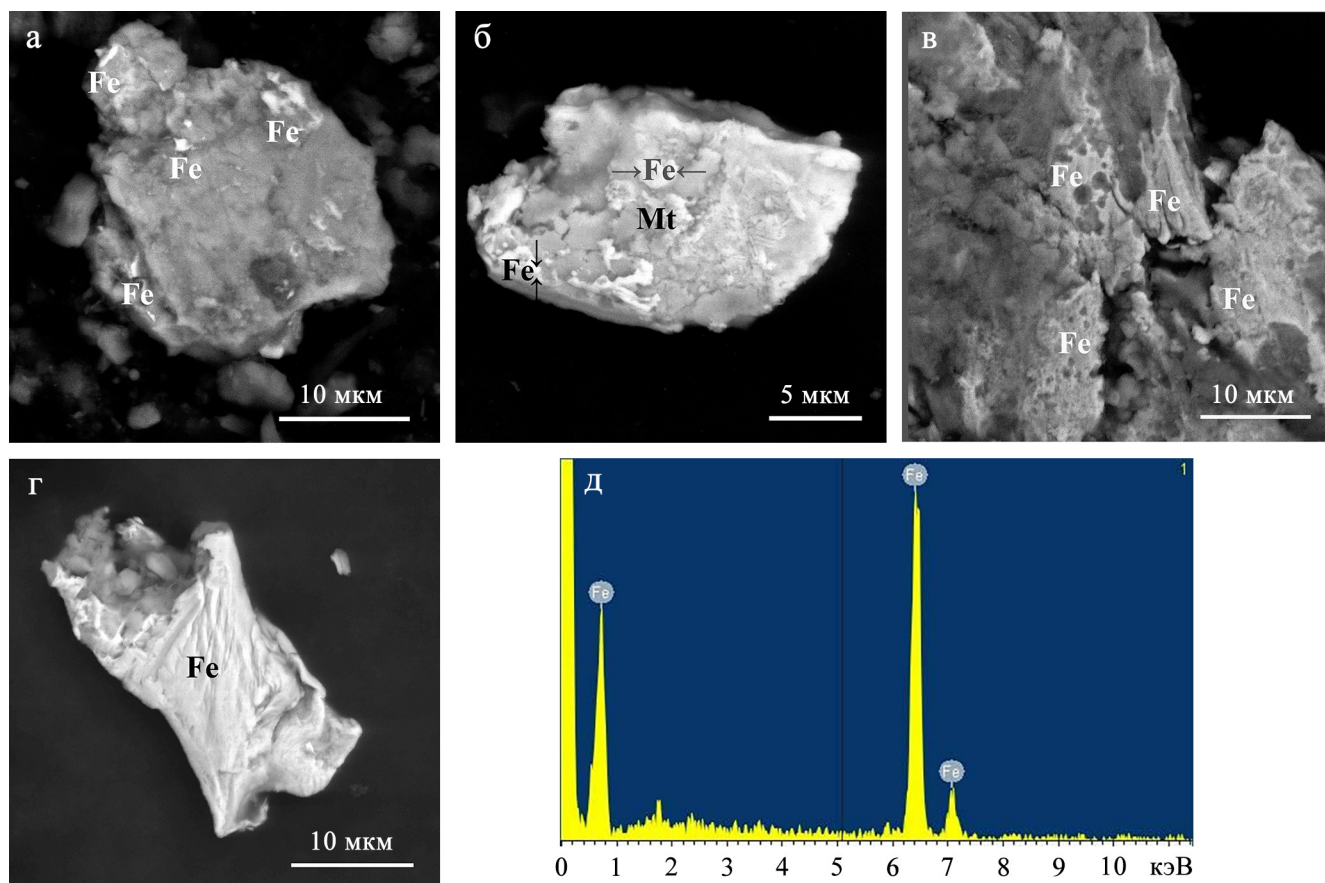


Рис. 7. Пленки чистого железа на поверхности частиц земного происхождения (а–г) и типичный спектр пленки железа (д).

Fig. 7. Films of pure iron on the surface of particles of terrestrial origin (а–г) and a typical spectrum of an iron film (д).

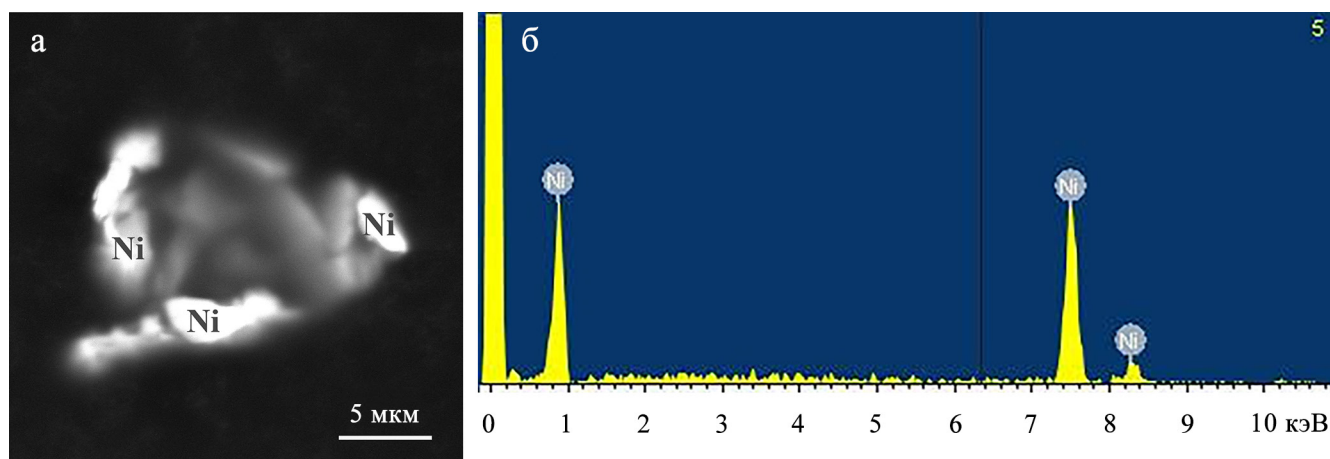


Рис. 8. Пленки чистого никеля на поверхности частицы земного происхождения (а) и типичный спектр никелевой пленки (б).

Fig. 8. Films of pure nickel on the surface of a particle of terrestrial origin (а) and a typical spectrum of a nickel film (б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При изучении найденных в районе взрыва ЧКТ массивных объектов, потенциально его фрагментов, по сумме признаков они не были отнесены к космогенным. Поиски микрочастиц в качестве “следов” болида привели к обнаружению микросфер с особой морфологией, с микроразмерными включениями, наноструктурами на их поверхности. Версия кометного происхождения найденных микрочастиц как образовавшихся в результате взрыва ЧКТ при входе в плотные слои атмосферы, по мнению авторов, находит материальное подтверждение при изучении состава и микроструктуры частиц, найденных в трех точках по трассе полета ЧКТ. Поскольку именно микрочастицы, обнаруженные в пробах из “следа”, а не макрообъекты указывают на возможную кометную природу ЧКТ, то такой подход следует сделать рабочим в дальнейших исследованиях и поисках материальных доказательств кометного происхождения Чулымского болида. Выделены объекты с эффектом внедрения высокоскоростных частиц кометного происхождения в земные частицы.

Обнаруженные нами на микросферах микропористые образования и наноразмерные кристаллы-включения, а также железосодержащие алюмосиликатные наноструктуры, не имеющие аналогов среди земных и техногенных структур, являются отличительными особенностями на микро- и наноуровне. Соответственно, их можно рассматривать как отличительные и диагностические признаки при оценке принадлежности изученных частиц к кометному материалу. Обнаружение тонких пленок железа и никеля на частицах земного происхождения может быть использовано в качестве диагностического признака кометного вещества, нанесенного на земное, при разрушении метеороида в атмосфере или на поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А.О., Алексеева Т.В., Афанасьева А.Н., Гурвер Р.Б., Капралов М.И., Ривкина Е.М., Рюмин А.К., Самылина О.С., Симаков М.Б., Снытников В.Н., Фронтасьева М.В., Цельмович В.А., Сапрыкин Е.А., Розанов А.Ю. (2024) Астробиология. Дубна: Объединенный институт ядерных исследований, 199 с.
- Войцеховский А.И. (1990) Виновница земных бед? Знак вопроса. 48 с.
- Дорофеева В.А. (2020) Химический и изотопный состав кометы 67P/Чурюмова–Герасименко (обзор результатов космической миссии “Rosetta/Philae”). Следствия для космогонии и космохимии. *Астрономический вестн. Исследование Солнечной системы*, **54**(2), 110-134.
- Ивочкин Ю.П., Бородина Т.И., Казаков А.Н., Тепляков И.О. (2020) Экспериментально-расчетное исследование возможности получения аморфных сплавов при взрывной фрагментации горячих капель в кипящем охладителе. *Тепловые процессы в технике*, **12**(3), 136-142.
- Кириллова С.А., Альмяшев В.И. (2012) Формирование сложноорганизованных наноструктур на основе системы $FeO_x-SiO_2-TiO_2$. *Наносистемы: физика, химия, математика*, **3**(6), 98-104.
- Коробейников В.П., Чушкит П.И., Шуршалов Л.В. (1990) Тунгусский феномен: газодинамическое регулирование. *Следы космических воздействий на Землю*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-е, 59-79.
- Маршинцев В.К. (1990) Природа сфероидных образований в кимберлитах. *Следы космических воздействий на Землю*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-е, 45-48 с.
- Печерский Д.М., Кандинов М.Н., Марков Г.П., Пляшкевич А.А., Цельмович В.А. (2012) Сочетание термомангнитных и микроразмерных исследований внеземных магнитных минералов: информация о строении и эволюции планет. *Исследовано в России*, 437-452.
- Печерский Д.М., Кузина Д.М., Марков Г.П., Цельмович В.А. (2017) Самородное железо на Земле и в космосе. *Физика Земли*, (5), 44-62.
- Печерский Д.М., Марков Г.П., Цельмович В.А. (2015) Чистое железо и другие магнитные минералы в метеоритах. *Астрономический вестн. Исследования Солнечной системы*, **49**(1), 65-75.
- Смирнова Е.М., Евдокименко Н.Д., Решетина М.В., Демихова Н.Р., Кустов А.Л., Дунаев С.Ф., Винокурова В.А., Глотова А.П. (2023) Fe- и Cu-Zn-содержащие катализаторы на основе природных алюмосиликатных нанотрубок и цеолита H-ZSM-5 в гидрировании углекислого газа. *Журн. физич. химии*, **97**(5), 952-959.
- Ханхасаева С.Ц., Брызгалова Л.В., Дашинамжилова Э.Ц. (2003) Fe-пиллар-глины в процессах очистки сточных вод от органических красителей. *Экология и промышленность России*, (12), 37-39.
- Цельмович В.А. (2023) Микроскопические следы комет, упавших на Землю. *Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле*. Мат-лы 24-й Междунар. конф. М.: ИГЕМ РАН, 302-305.
- Цельмович В.А. (2012а) Самородные металлы и космические минералы из астроблемы Цэнхэр. *Минералы: строение, свойства, методы исследования*. Мат-лы 4-й Всерос. молодежн. научн. конф. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 257-259.
- Цельмович В.А. (2012б) Частицы самородных металлов как возможные индикаторы вещества Тунгусского метеорита. *Феномен Тунгуски: на перекрестке идей. Второе столетие изучения Тунгусского события 1908 г.* Сб. научн. тр. Новосибирск, 105-107.
- Цельмович В.А., Куражковский А.Ю., Казанский А.Ю., Щетников А.А., Бляхарчук Т.А., Филиппов Д.А. (2019) Исследование динамики поступления космической пыли на земную поверхность по торфяным отложениям. *Физика Земли*, (3), 150-160.
- Цельмович В.А., Люхин А.М., Шеремет В.А. (2018) Следы ударного процесса на минералах из кратеров Carolina Bays (восточное побережье США). *Тр. Всерос. ежегодн. семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии*. М.: ГЕОХИ РАН, 373-376.
- Цельмович В.А., Максе Л.П. (2022) Магнитные микросферы антропогенного и космогенного происхождения и их подобие. *Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле*. Мат-лы

- 23-й Междунар. конф. М.: ИГЕМ РАН, 292-295.
- Цельмович В.А., Шельмин В.Г. (2023) Метеорит, домна или природный пожар? *Тр. Всерос. ежегодн. семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии*. М.: ГЕОХИ РАН, 352-356.
- Цельмович В.А., Шельмин В.Г., Максе Л.П. (2023) В поисках следов Чулымского болида. *Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле*. Мат-лы 24-й Междунар. конф. М.: ИГЕМ РАН, 306-310.
- Цельмович В.А., Шельмин В.Г., Максе Л.П., Куражковский А.Ю. (2024) Микроскопические следы Чулымского болида (падение 1984 года, точка 1, Минаевка). *Тр. Всерос. ежегодн. семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии*. М.: ГЕОХИ РАН, 288-293.
- Цыганков О.С., Гребенникова Т.В., Дешевая Е.А., Лапшин В.Б., Морозова М.А., Новикова Н.Д., Поликарпов Н.А., Сыроешкин А.В., Шубралова Е.В., Шувалов В.А. (2015) Исследования мелкодисперсной среды на внешней поверхности Международной космической станции в эксперименте "Тест": обнаружены жизнеспособные микробиологические объекты. *Космич. техника и технология*, (1), 31-42.
- Шмидт О.Ю. (1949) Четыре лекции о теории происхождения Земли. Акад. наук СССР, Геофиз. ин-т. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 72 с.
- Antipov S.N., Schepers L.P.T., Vasiliev M.M., Petrov O.F. (2016) Dynamic Behavior of Polydisperse Dust System in Cryogenic Gas Discharge Complex Plasmas. *Contrib. Plasma Phys.*, **56**(3-4), 296-301.
- Blum J., Gundlach B., Krause M., Fulle M., Johansen A., Agarwal J., von Borstel I., Shi X., Hu X., Bentley M.S., Capaccioni F., Colangeli L., Corte V.D., Fougere N., Green S.F., Ivanovski S., Mannel T., Merouane S., Migliorini A., Rotundi A., Schmied R., Snodgrass C. (2017) Evidence for the formation of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko through gravitational collapse of a bound clump of pebbles. *Mon. Not. Royal Astronom. Soc.*, **469**(2), 755-773.
- Brownlee D.E. (1985) Cosmic Dust: Collection and Research. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, (13), 147-173.
- Brownlee D.E. (2016) Cosmic Dust: Building Blocks of Planets Falling from the Sky. *Elements*, **12**(3), 165-170.
- Drolshagen S., Kretschmer J., Poppe B. (2017) Mass accumulation of earth from interplanetary dust, meteoroids, asteroids and comets. *Planet. Space Sci.*, **143**, 21-27.
- Guilbert-Lepoutre A., Rosenberg E., Prialnik D., Besse S. (2016) Modelling the evolution of a comet subsurface: implications for 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Mon. Not. Royal Astronom. Soc.*, **462**(Suppl. 1), 146-155.
- Guzik P., Drahus M. (2021) Gaseous atomic nickel in the coma of interstellar comet 2I/Borisov. *Nature*, **593**, 375-378. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03485-4>
- Heck P.R., Greer J., Kööp L., Trappitsch R., Gyngard F., Busemann H., Maden C., Ávila J.N., Davis A.M., Wiegler R. (2020) Lifetimes of interstellar dust from cosmic ray exposure ages of presolar silicon carbide. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, **117**(4), 1884-1889.
- Levasseur-Regourd A.-Ch., Agarwal J., Cottin H., Engrand C., Flynn G., Marco F., Tamas G., Yves L., Jérémie L., Thurid M., Sihane M., Poch O., Thomas N., Westphal A. (2018) Cometary Dust. *Space. Sci. Rev.*, **214**(64). <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0496-3>
- Manfroid J., Hutsemékers D., Jehin E. (2021) Iron and nickel atoms in cometary atmospheres even far from the Sun. *Nature*, **593**, 372-374.
- Miller J.A., Opher M., Hatzaki M., Papachristopoulou K., Thomas B.C. (2024) Earth's mesosphere during possible encounters with massive interstellar clouds 2 and 7 million years ago. *Geophys. Res. Lett.*, **51**(17), 1-9. <https://doi.org/10.1029/2024GL110174>
- Mintova S., Jaber M., Valtchev V. (2015) Nanosized microporous crystals: emerging applications. *Chem. Soc. Rev.*, **44**, 7207.
- Napier W.M., Wickramasinghe J.T., Wickramasinghe N.C. (2007) The origin of life in comets. *Int. J. Astrobiol.*, **6**(4), 321-323.
- Simonia Ir. (2011) Organic component of cometary ice. *Astrophys. Space Sci.*, **332**, 91-98.
- Tomkins A.G., Bowlt L., Genge M.J., Wilson S.A., Brand H.E., Wykes J.L. (2016) Ancient micrometeorites suggestive of an oxygen-rich Archaean upper atmosphere. *Nature*, **533**, 235-238.
- Tosheva L., Brockbank A., Mihailova B., Sutula J., Ludwig J., Potgiete H., Verran J. (2012) Micron and nanosized FAU-type zeolites from fly ash for antibacterial applications. *J. Mater. Chem.*, **22**(33), 16897-16905.
- Tselmovich V.A., Amelin I.L., Gusiakov V.K., Kirillov V.E., Kurazhkovskiy A.Y. (2023) On the Possible Cometary Nature of the Uchur Cosmic Body (Fall 3.08. 1993). *Adv. Geol. Geotech. Engin. Res.*, **05**(03), 16-24.
- Walton C.R., Rigley J.K., Lipp A. et al. (2024) Cosmic dust fertilization of glacial prebiotic chemistry on early Earth. *Nat. Astron.*, **8**, 556-566. <https://doi.org/10.1038/s41550-024-02212-z>
- Weissman P., Morbidelli A., Davidsson B., Blum J. (2020) Origin and Evolution of Cometary Nuclei. *Space Sci. Rev.*, **216**, 6. <https://doi.org/10.1007/s11214-019-0625-7>
- Zieba S., Zwintz K., Kenworthy M.A., Kennedy G.M. (2019) Transiting exocomets detected in broadband light by TESS in the β Pictoris system. *Astron. Astrophys.*, **2**(4), 1-8. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935552>
- Zolensky M.E., Krot A.N., Benedix G. (2008) Record of low-temperature alteration in asteroids. *Oxygen in the Solar System, MSA. Rev. Mineral. Geochem.*, **68**, 429-462.

REFERENCES

- clump of pebbles. *Mon. Not. Royal Astronom. Soc.*, **469**(2), 755-773.
- Brownlee D.E. (1985) Cosmic Dust: Collection and Research. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, (13), 147-173.
- Brownlee D.E. (2016) Cosmic Dust: Building Blocks of Planets Falling from the Sky. *Elements*, **12**(3), 165-170.
- Dorofeeva V.A. (2020) Chemical and Isotopic Composition of Comet 67P/Churyumov–Gerasimenko (Review of the Results of the Rosetta/Philae Space Mission). Implications for Cosmogony and Cosmochemistry. *Astronom. Vestnik. Issledovanie Solnechnoi Sistemy*, **54**(2), 110-134. (In Russ.)
- Drolshagen S., Kretschmer J., Poppe B. (2017) Mass accumulation of earth from interplanetary dust, meteoroids, asteroids and comets. *Planet. Space Sci.*, **143**, 21-27.
- Guilbert-Lepoutre A., Rosenberg E., Prialnik D., Besse S. (2016) Modelling the evolution of a comet subsurface: implications for 67P/Churyumov–Gerasimenko. *Mon. Not. Royal Astronom. Soc.*, **462**(Suppl. 1), 146-155.
- Guzik P., Drahus M. (2021) Gaseous atomic nickel in the coma of interstellar comet 2I/Borisov. *Nature*, **593**, 375-378. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03485-4>
- Heck P.R., Greer J., Kööp L., Trappitsch R., Gyngard F., Busemann H., Maden C., Ávila J.N., Davis A.M., Wierler R. (2020) Lifetimes of interstellar dust from cosmic ray exposure ages of presolar silicon carbide. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, **117**(4), 1884-1889.
- Ivochkin Yu.P., Borodina T.I., Kazakov A.N., Teplyakov I.O. (2020) Experimental and Computational Study of the Possibility of Obtaining Amorphous Alloys by Explosive Fragmentation of Hot Droplets in a Low-Boiling Coolant. *Teplovye Protssesy v Tekhnike*, **12**(3), 136-142. (In Russ.)
- Khankhasaeva S.Ts., Bryzgalova L.V., Dashinamzhilova E.Ts. (2003) Fe-pillar clays in wastewater treatment processes from organic dyes. *Ekologiya i Promyshlennost' Rossii*, (12), 37-39. (In Russ.)
- Kirillova S.A., Al'myashev V.I. (2012) Formation of complex nanostructures based on the FeO_x-SiO₂-TiO₂ system. *Nanosystemy: Fizika, Khimiya, Matematika*, **3**(6), 98-104. (In Russ.)
- Korobeinikov V.P., Chushkit P.I., Shurshalov L.V. (1990) Tunguska phenomenon: gas-dynamic regulation. *Traces of cosmic impacts on the Earth*. Novosibirsk, Nauka. Sibirskoe otd. Publ., 59-79. (In Russ.)
- Levasseur-Regourd A.-Ch., Agarwal J., Cottin H., Enggrand C., Flynn G., Marco F., Tamas G., Yves L., Jérémie L., Thurid M., Sihane M., Poch O., Thomas N., Westphal A. (2018) Cometary Dust. *Space. Sci. Rev.*, **214**(64). <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0496-3>
- Manfroid J., Hutsemékers D., Jehin E. (2021) Iron and nickel atoms in cometary atmospheres even far from the Sun. *Nature*, **593**, 372-374.
- Marshintsev V.K. (1990) The nature of spheroid formations in kimberlites. *Traces of cosmic impacts on the Earth*. Novosibirsk, Nauka. Sibirskoe otd. Publ., 45-48. (In Russ.)
- Miller J.A., Opher M., Hatzaki M., Papachristopoulou K., Thomas B.C. (2024) Earth's mesosphere during possible encounters with massive interstellar clouds 2 and 7 million years ago. *Geophys. Res. Lett.*, **51**(17), 1-9. <https://doi.org/10.1029/2024GL110174>
- Mintova S., Jaber M., Valtchev V. (2015) Nanosized microporous crystals: emerging applications. *Chem. Soc. Rev.*, **44**, 7207.
- Napier W.M., Wickramasinghe J.T., Wickramasinghe N.C. (2007) The origin of life in comets. *Int. J. Astrobiol.*, **6**(4), 321-323.
- Pecherskii D.M., Kandinov M.N., Markov G.P., Plyashkevich A.A., Tsel'movich V.A. (2012) Combination of thermomagnetic and microprobe studies of extraterrestrial magnetic minerals: information on the structure and evolution of planets. *Researched in Russia*, 437-452. (In Russ.)
- Pecherskii D.M., Kuzina D.M., Markov G.P., Tsel'movich V.A. (2017) Native iron on Earth and in space. *Fizika Zemli*, (5), 44-62. (In Russ.)
- Pecherskii D.M., Markov G.P., Tsel'movich V.A. (2015) Pure iron and other magnetic minerals in meteorites. *Astronom. Vestnik. Issledovanie Solnechnoi Sistemy*, **49**(1), 65-75. (In Russ.)
- Shmidt O.Yu. (1949) Four Lectures on the Theory of the Earth's Origin. USSR Academy of Sciences, Geophys. Inst. Moscow; Leningrad, Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 72 p. (In Russ.)
- Simonia Ir. (2011) Organic component of cometary ice. *Astrophys. Space Sci.*, **332**, 91-98.
- Smirnova E.M., Evdokimenko N.D., Reshetina M.V., Demikhova N.R., Kustov A.L., Dunaev S.F., Vinokurova V.A., Glotova A.P. (2023) Fe- and Cu-Zn-containing catalysts based on natural aluminosilicate nanotubes and H-ZSM-5 zeolite in carbon dioxide hydrogenation. *Ros. Zhurnal Fizicheskoi Khimii*, **97**(5), 952-959. (In Russ.)
- Tomkins A.G., Bowlt L., Genge M.J., Wilson S.A., Brand H.E., Wykes J.L. (2016) Ancient micrometeorites suggestive of an oxygen-rich Archaean upper atmosphere. *Nature*, **533**, 235-238.
- Tosheva L., Brockbank A., Mihailova B., Sutula J., Ludwig J., Potgiete H., Verran J. (2012) Micron and nanosized FAU-type zeolites from fly ash for antibacterial applications. *J. Mater. Chem.*, **22**(33), 16897-16905.
- Tsel'movich V.A. (2012a) Native metals and space minerals from the Tsenkher astrobleme. *Minerals: structure, properties, research methods*. Proc. of the 4th All-Russian Youth Sci. Conf. Ekaterinburg, Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 257-259. (In Russ.)
- Tsel'movich V.A. (2012b) Particles of native metals as possible indicators of the substance of the Tunguska meteorite. In the collection The Tunguska Phenomenon: at the crossroads of ideas. *The second century of studying the Tunguska Event of 1908*. Collection of scientific papers. Novosibirsk, 105-107. (In Russ.)
- Tsel'movich V.A. (2023) Microscopic Traces of Comets That Fell to Earth. *Physicochemical and Petrophysical Research in Earth Sciences*. Proc. of the 24th Int. Conf. Moscow, IGEM RAN Publ., 302-305. (In Russ.)
- Tsel'movich V.A., Kurazhkovskii A.Yu., Kazanskii A.Yu., Shchetnikov A.A., Blyakharchuk T.A., Filippov D.A. (2019) Study of the dynamics of cosmic dust input to the earth's surface through peat deposits. *Fizika Zemli*, (3), 150-160. (In Russ.)
- Tsel'movich V.A., Lyukhin A.M., Sheremet V.A. (2018) Traces of the impact process on minerals from the Carolina Bays craters (East coast of the USA). *Tr. Vseros. annual seminar on experimental mineralogy, petrology and geochemistry*. Moscow, GEOkhi RAN Publ., 373-376.
- Tsel'movich V.A., Makse L.P. (2022) Magnetic microspheres of anthropogenic and cosmogenic origin and

- their similarity. *Physicochemical and Petrophysical Research in Earth Sciences*. Proc. of the 23rd Int. Conf. Moscow, IGEM RAN Publ., 292-295. (In Russ.)
- Tsel'movich V.A., Shel'min V.G. (2023) Meteorite, Blast Furnace or Natural Fire? *Proceedings of the All-Russian Annual Seminar on Experimental Mineralogy, Petrology and Geochemistry*. Moscow, GEOKhI RAN Publ., 352-356. (In Russ.)
- Tsel'movich V.A., Shel'min V.G., Makse L.P. (2023) In Search of Traces of the Chulym Bolide. *Physicochemical and Petrophysical Research in Earth Sciences*. Proc. of the 24th Int. Conf. Moscow, IGEM RAN Publ., 306-310. (In Russ.)
- Tsel'movich V.A., Shelmin V.G., Makse L.P., Kurazhkovskii A.Yu. (2024) Microscopic Traces of the Chulym Bolide (Fall of 1984, Point 1, Minaevka). *Proc. of the All-Russian Annual Seminar on Experimental Mineralogy, Petrology and Geochemistry*. Moscow, GEOKhI RAN Publ., 288-293. (In Russ.)
- Tselmovich V.A., Amelin I.I., Gusiakov V.K., Kirillov V.E., Kurazhkovskiy A.Y. (2023) On the Possible Cometary Nature of the Uchur Cosmic Body (Fall 3.08. 1993). *Adv. Geol. Geotech. Engin. Res.*, **05**(03), 16-24.
- Tsygankov O.S., Grebennikova T.V., Deshevaya E.A., Lapshin V.B., Morozova M.A., Novikova N.D., Polikarpov N.A., Syroeshkin A.V., Shubralova E.V., Shuvalov V.A. (2015) Studies of finely dispersed environment on the external surface of the International Space Station in the "Test" experiment: viable microbiological objects were discovered. *Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, (1), 31-42. (In Russ.)
- Voitsekhovskii A.I. (1990) The Culprit of Earth's Troubles? *Question Mark*. 48 p. (In Russ.)
- Walton C.R., Rigley J.K., Lipp A. et al. (2024) Cosmic dust fertilization of glacial prebiotic chemistry on early Earth. *Nat. Astron.*, **8**, 556-566. <https://doi.org/10.1038/s41550-024-02212-z>
- Weissman P., Morbidelli A., Davidsson B., Blum J. (2020) Origin and Evolution of Cometary Nuclei. *Space Sci. Rev.*, **216**, 6. <https://doi.org/10.1007/s11214-019-0625-7>
- Zieba S., Zwintz K., Kenworthy M.A., Kennedy G.M. (2019) Transiting exocomets detected in broadband light by TESS in the β Pictoris system. *Astron. Astrophys.*, **2**(4), 1-8. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935552>
- Zolensky M.E., Krot A.N., Benedix G. (2008) Record of low-temperature alteration in asteroids. *Oxygen in the Solar System, MSA. Rev. Mineral. Geochem.*, **68**, 429-462.