

МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА ГЛОБАЛЬНЫХ КАТАСТРОФ

В истории Земли известно множество катастрофических событий локального и планетарного масштаба, которые приводили к значительным изменениям климата и видового состава живых организмов, вплоть до массовых вымираний. Следы этих событий запечатлены в геологической летописи Земли. Среди основных причин, вызывающих катастрофические изменения биоты, рассматривают либо вулканическую деятельность, либо импактные события — столкновение Земли с астероидами и кометами. Как вулканические, так и космические события приводили к выбросу огромного количества микрочастиц пыли, строение и состав которых соответствовали характеру катастроф.

Как космическая пыль помогла установить причину вымирания динозавров? О чём может поведать обычный болотный торф? Каким образом метеориты влияют на судьбы человечества? Есть ли угроза нынешней цивилизации и где она может крыться? Рассказывает Владимир Анатольевич ЦЕЛЬМОВИЧ, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории палеомагнетизма и физико-химических свойств горных пород Геофизической обсерватории «Борок» — филиала Института физики Земли РАН.

Беседу ведёт Наталия Лескова.

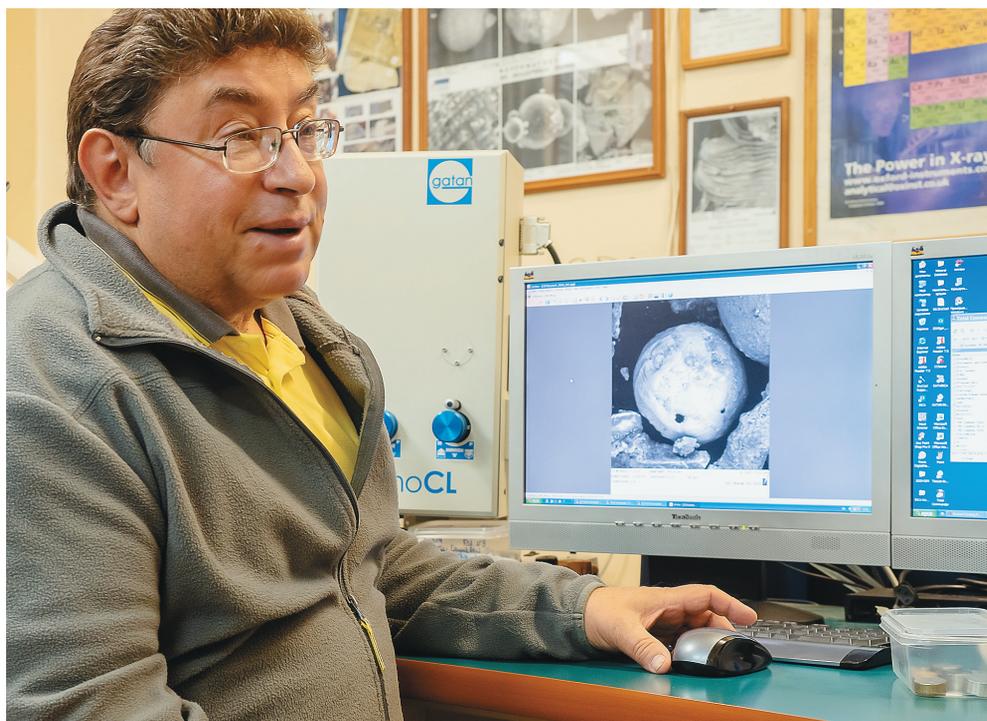


Фото Андрей Афанасьев

— Владимир Анатольевич, многие ваши работы посвящены космической пыли. Даже на экране вашего компьютера виден её фрагмент. Расскажите, что такое космическая пыль и как вы её изучаете?

— Основное направление работы лаборатории — палеомагнетизм, то есть определение магнитного поля Земли в отдалённые геологические эпохи по остаточному намагничению образцов горных

пород. При палеомагнитных исследованиях мы наработали достаточно большой инструментарий для микрозондового изучения магнитных частиц. Главный аналитический метод, который мы используем, — это метод сканирующей электронной микроскопии с микроанализом. Он позволяет получать не только картинку, но и полный химический состав образца в любой точке размером порядка одного микрона. Практически вся периодическая система, от бора до урана, может быть проанализирована за считанные секунды или минуты. Параллельно мы используем и другие методы, поскольку для решения сложных задач одного аналитического метода, как правило, недостаточно. Поэтому у нас есть и рентгеновский дифрактометр, и целый комплекс приборов для магнитных исследований. Причём это не только та аппаратура, которую можно купить, которую производят большие предприятия, но и магнитометрическая аппаратура, разработанная у нас, в нашей лаборатории. Её производят здесь, в Борке, и снабжают ею другие палеомагнитные лаборатории в России. Эти наработки мы перенесли на новый объект — космическую пыль, её магнитную компоненту. Ключевой момент здесь — пробоподготовка, для чего была создана и оборудована специальная «чистая» комната.

Космическая пыль, которую мы изучаем, — ископаемая, а совсем не та, которую ловят где-нибудь в космосе: такую поймать и доставить на Землю — очень сложная и дорогостоящая задача. Приведу пример с американским проектом «Стардаст» (англ. Stardust — звёздная пыль), который стартовал в 1999 году. В рамках этого проекта космической корабль стоимостью более двухсот миллионов долларов шесть лет бороздил космическое пространство. В итоге в ловушку, установленную на этом аппарате, попало несколько частичек пыли микронного размера, хотя планировалось, что их там будут миллионы. После того, как корабль приземлился, ловушку распилили на огромное количество тонких пластин. Были сделаны миллионы фотографий, и 30 тысяч волонтеров на протяжении многих лет их изучали. Бонусом для них было то, что частичку космической пыли могли назвать именем человека, который её нашёл.

При этом большинство частичек, попавших в эту ловушку, оказались частицами кремниевых батарей корабля, выбитыми микрометеоритами. За долгие годы существования этого проекта удалось выделить лишь семь частичек микронного размера, которые можно считать кандидатами на истинно космическую пыль. Исследователи так дорожат этими частичками, что разрабатывают специальную технику, которая станет их анализировать.

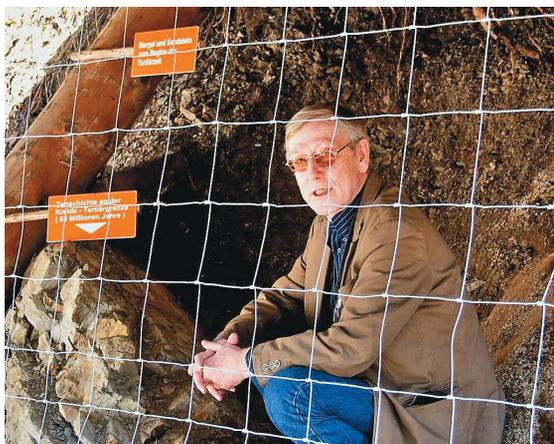
— Ну, а вы как добываете свою космическую пыль?

— Космическая пыль сыплется из космоса постоянно — порядка ста тонн в день. Она попадает во все существующие в природе «планшеты», из которых эту пыль можно выделить. Конечно, такими «планшетами» служат льды Арктики и Антарктики. Я изучал частицы из снега, отобранного коллегами на станции «Восток». Образцы снега в специальных бочках погрузили в холодильник судна и доставили во Францию, в Гренобль, где в условиях чистой комнаты снег расплавили, а воду пропустили через специальный фильтр. Из 200 литров снега выделялось 0,4 мг пыли.

У нас тогда не было «чистых» комнат. Однако французский оператор, у которого был прибор, аналогичный моему, не имел навыков работы с космической пылью, поэтому он не смог идентифицировать эти частицы и отделить их от других. Российскому руководителю этого проекта Сергею Булату подсказали, что задача может быть решена в Борке, и, действительно, мы достаточно быстро её решили. Работа была опубликована в журнале «Лёд и снег»*.

Надо сказать, что к тому моменту у меня был уже большой опыт работы с ископаемой космической пылью. Начало было положено в 2005 году исследованием образцов с границы мела и палеогена. А граница мела и палеогена — это та граница, которая, по

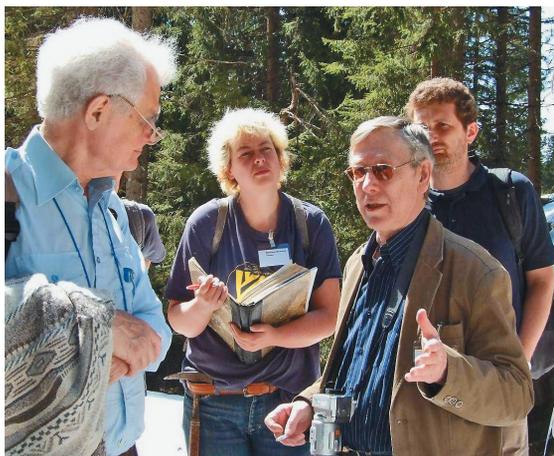
* Булат Е. С., Цельмович В. А., Пети Ж.-Р., Гиндилис Л. М., Булат С. А. Снежный покров Центральной Антарктиды (станция Восток) как идеальный природный планшет для сбора космической пыли: предварительные результаты по выявлению микрометеоритов типа углистых хондритов. // Лёд и снег, 2012, № 52(4). С. 146—152.



А. Ф. Грачёв за отбором образцов осадочных пород с границы мела и палеогена в разрезе Гамс (Австрия).



Результаты исследований образцов, содержащих космическую пыль, А. Ф. Грачёв обсудил с коллегами на конференции в Гамсе (апрель 2009 года).



сути, отделяет две геологические эпохи. И считается, что якобы именно на границе этих эпох, примерно 65 миллионов лет назад, произошла катастрофа, приведшая к гибели динозавров. Этой работой руководил Андрей Фёдорович Грачёв — выдающийся российский геолог, доктор геолого-минералогических наук, работавший в Институте физики Земли РАН, он и пригласил меня участвовать в проекте.

Если посмотреть на картинки на стенах нашей лаборатории, можно увидеть тоненький слой глины, отделяющий отложения мела и палеогена. Особенность моего исследования заключалась в том, что я изучал эту глину не целиком, а разрезал её на несколько слоёв. И выяснилось, что только самый верхний слой содержит очень интересные, необычные частицы. Когда стали разбираться, поняли, что это частицы, характерные для импактного события, то есть образовавшиеся при столкновении Земли с крупным астероидом.

Собственно говоря, так получилось, что здесь, в Борке, были примирены две «враждующие» стороны, спорящие о причинах катастрофического вымирания на границе мела и палеогена. Известно около трёх тысяч научных работ в пользу того, что катастрофа имела вулканическую природу, и примерно столько же работ в пользу импактного события. И у каждой из сторон свои серьёзные доводы. Действительно, в тот период имел место серьёзный вулканический процесс. Об этом свидетельствуют гигантские траппы на плато Декан в Индии, сформированные вулканическими породами. Однако многие исследователи считали, что катастрофа произошла из-за столкновения с астероидом. В нашей работе было показано, что импактная катастрофа действительно была, но уже после вулканической, а началом массового вымирания динозавров послужил всё-таки вулканизм.

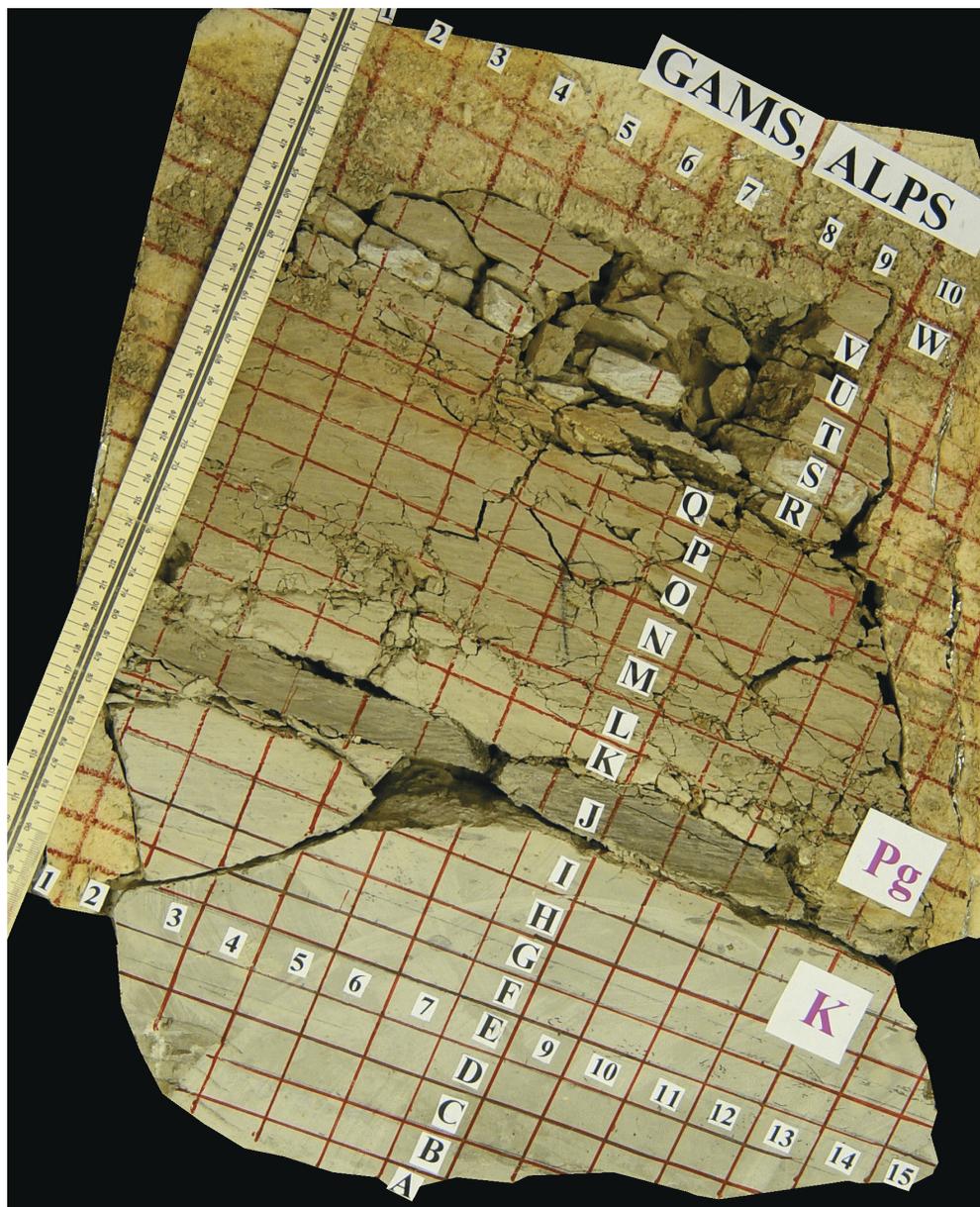
— Так динозавры погибли в результате первой, второй или обеих катастроф?

— Они начали погибать в тот момент, когда начались вулканические извержения, потому что тогда в биоту попало огромное количество мышьяка. Есть версия, что именно мышьяк стал причиной их гибели. Аномально высокие количества мышьяка присутствуют в скорлупе яиц, найденных далеко от места излияния траппов.

— А столкновение с астероидом их добило?

— Похоже на то, что вымирание динозавров было процессом длительным. Формирование переходного слоя между мелом и палеогеном шло не менее двух тысяч лет, и в конце этого периода случился импакт.

Эта наша работа — а сделана она была благодаря помощи австрийских коллег — началась с того, что Андрей Фёдорович Грачёв увидел в Музее естественной истории в Вене великолепный монолит с границы мела и палеогена и загорелся желанием его изучить. Он привлёк иссле-



Монолит осадочной породы из разреза Гамс в Восточных Альпах, хранящийся в Музее естественной истории в Вене (Австрия) с нанесённой разметкой перед взятием образцов для исследования. Переходный глинистый слой между мелом и палеогеном отмечен буквой J.

Иллюстрация из статьи: A. F. Grachev, O. A. Korchagin, H. A. Kollmann, D. M. Pechersky, and V. A. Tsel'movich. Russ. J. Earth Sci., 2005, vol. 7, No. 6, pp. 1–45.

дователей из различных институтов Российской академии наук, в том числе меня. И когда после первых же экспериментов я показал, что там есть нечто необычное, а именно частицы никеля и алмазы очевидно импактного происхождения, этот монолит вызвал огромный интерес — работать с ним захотели многие. Получилось хорошее научное исследование, мы написали монографию, а в 2009 году в Австрии провели международную конференцию, организованную фактически под нашу научную группу. Приехали около двухсот человек, занимавшихся мел-палеогеновой катастрофой. Мы плодотворно ругались целую неделю, а потом выехали на разрез Гамс в Восточных Альпах, откуда был монолит, и взяли новые образцы — всё совпало. Чуть позже мы с коллегой Олегом Корчагиным из Геологического института РАН повторили исследование на образцах из разреза Стевенс-Клинт в Дании и получили сходные данные.

— *А были в истории нашей планеты другие катастрофические события, повлёкшие массовые вымирания?*

— Безусловно, были. Массовых вымираний известно пять. То, что мы знаем о массовых вымираниях, которые произошли сотни миллионов лет назад, это очень интересно, но далеко от нас. В последнее время меня заинтересовало то, что было не так давно — в голоцене, то есть максимум 12—15 тысяч лет назад. Следы катастроф, случившихся в голоцене, можно обнаружить в торфе. По сути, я был первым, кто предложил использовать магнитные и физико-химические исследования для диагностики торфяных разрезов. Рассказал об этом на конференции, после чего сформировалась группа участников проекта. Нам выделили грант Российского фонда фундаментальных исследований, мы изучили несколько торфяных разрезов, как в Центральной России, так и на севере — в Вологодской области, а также в Кемеровской области и в Прибайкалье.

Работа была междисциплинарная. Например, томские исследователи занимались флорой и фауной и не имели отношения ни к вулканам, ни к импактам, но объект исследования был один и тот же — торфяники. Наше исследование позволило «зацепить» катастрофу, которая

произошла, по нашим датировкам, где-то пять тысяч лет назад и привела к смене биоценозов. Это означает, что изменилась растительность в районе торфяника: скажем, росли ели, а стали расти берёзы. Это зафиксировали и коллеги из Томска, в частности, доктор биологических наук Татьяна Артемьевна Бляхарчук из Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН. Они изучали семена, а мы — магнитные частицы. И когда мы наши данные сопоставили, то увидели, что пик совпадает и по их данным, и по нашим, магнитным и физико-химическим.

— *Неужели никто раньше не догадался заглянуть в торфяники?*

— Конечно, торфяники изучали и до меня. Тунгусское космическое тело тоже упало в районе торфяных болот, и тысячи людей на протяжении десятков лет копались в этом материале. Годами, десятилетиями энтузиасты отбирали пробы, квадрат за квадратом в районе Тунгуски. При этом, чтобы не тащить с собой горы торфа, сжигали его на месте и с собой для анализа везли уже золу. Однако при этом они находили не частицы Тунгусского космического тела, а продукты сгорания торфа. Впоследствии сжигать торф перестали, и ко мне попал разрез торфяника, отобранного экспедицией Виталия Ромейко в 2017 году. Из торфа удалось выделить частицы — индикаторы импакта, и я показал, что, скорее всего, это была комета. Причём не просто ледяная комета, а сгусток космической пыли. Что интересно, эту версию в своё время высказывал ещё Вернадский, а доказательство удалось найти сейчас.

Следующее исследование, которое тоже было осуществлено при поддержке РФФИ, — это изучение Учурского космического тела. Это падение современное, 1993 года. Место глухое, район Охотского моря. Мои новосибирские коллеги, узнавшие о том, что я могу диагностировать по небольшому количеству вещества какое-то событие, в 2016—2017 годах сумели пробиться на место падения или пролёта Учурского космического тела. Это были две экспедиции под руководством Ивана Амелина. Они отобрали торф, мох по трассе полёта и вне её, чтобы сопоставить эти образцы. Оказалось, что некоторые частицы, которые являются индикаторами импакт-

Изображения некоторых магнетитовых микросфер и металлических частиц, обнаруженных в переходном слое границы пермь–триас в разрезе Мэйшань на юго-востоке Китая.

Структуры: 1 — микросфера магнетита с бугристо-кристаллической текстурой поверхности; 2 — фрагмент микросферы магнетита (скорлупа), 2а — увеличенный фрагмент внутренней полости магнетитовой микросферы с игольчато-кристаллической текстурой; 3 — микросфера магнетита с игольчато-кристаллической текстурой поверхности; 4 — микросфера магнетита с бугристо-кристаллической текстурой поверхности; 5 — частица Ni оплавленной-полусферической формы; 6 — остроугольная частица сплава Fe–Cr–Ni; 7 — изогнутая пластина Fe с продольными бороздками; 8 — изогнутая пластина Fe с поперечными бороздками; 9 — изометричная частично оплавленная частица сплава Cr–Fe–Zn; 10 — оплавленная частица (зерно) магнетита Cr–Fe; 11 — пластина сплава Cu–Zn; 12 — пластина Zn на магнетите; 13 — оплавленная (корродированная) частица магнетита.

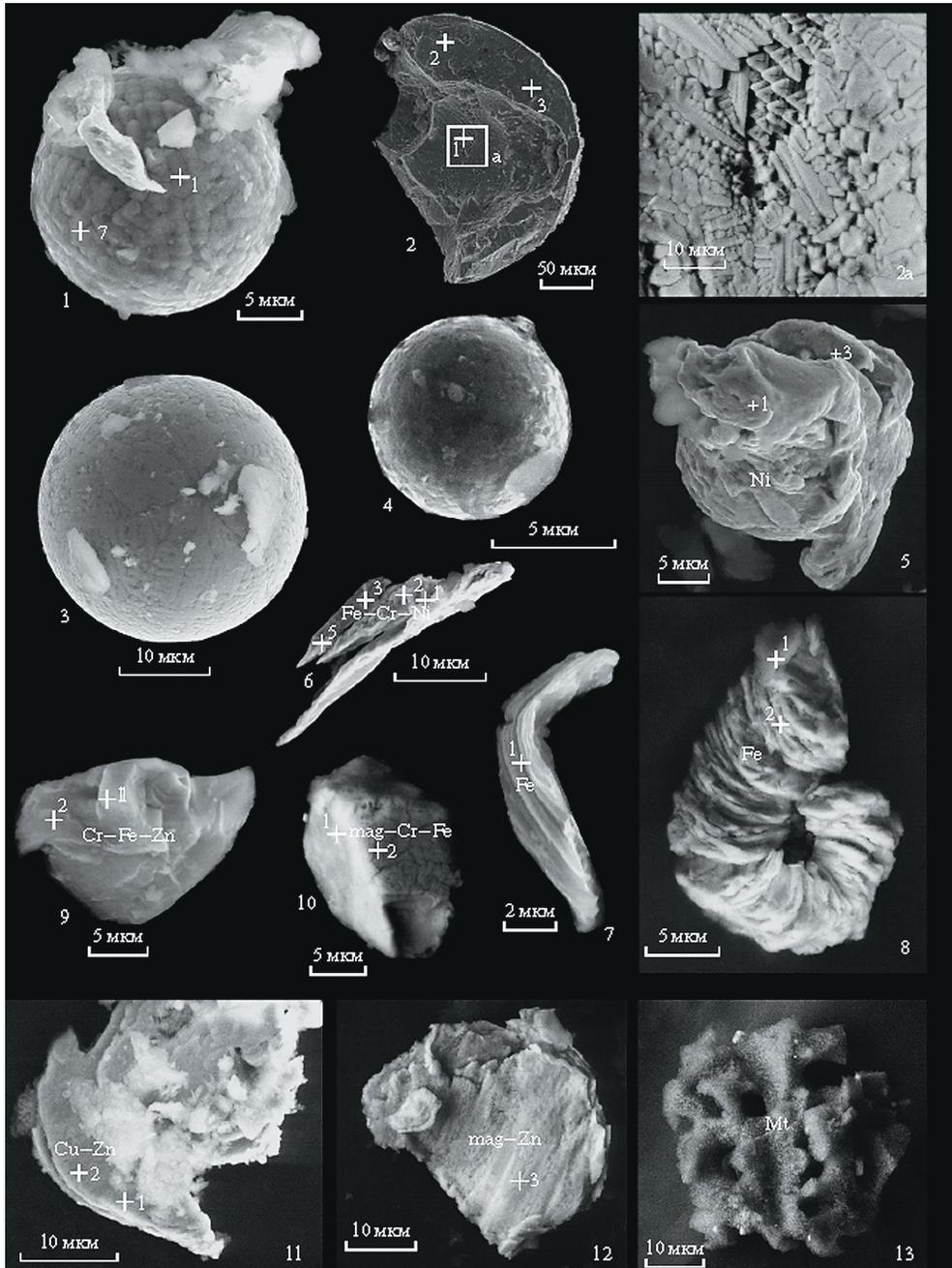


Иллюстрация из статьи: О. А. Корчагин, В. А. Цельмович, И. И. Поспелов, Цяньтао Бянь. Космические магнетитовые микросферы и металлические частицы вблизи границы пермь–триас в точке глобального стратотипа границы (слой 27, Мэйшань, Китай)//ДАН, 2010, том 432, № 2, с. 1–7.

Находки цилиндров с плёнками никеля — признак высокотемпературного импактного процесса. На фото: цилиндрическая плёнка Ni из торфяной толщи болота Тундра в Кемеровской области (а); тот же фрагмент при большом увеличении (б); цилиндрическая плёнка Ni из Коралловой воронки в районе падения Тунгусского космического тела (в); цилиндрическая плёнка Ni из мха по трассе Учурского космического тела (г). Подобные плёнки могли образоваться при наплавлении Ni с высокими лиофильными свойствами на углеродистые или силикатные палочки земного происхождения. Сравнивая эти находки, можно высказать предположение о том, что во всех трёх случаях имели место импактные события схожей природы.

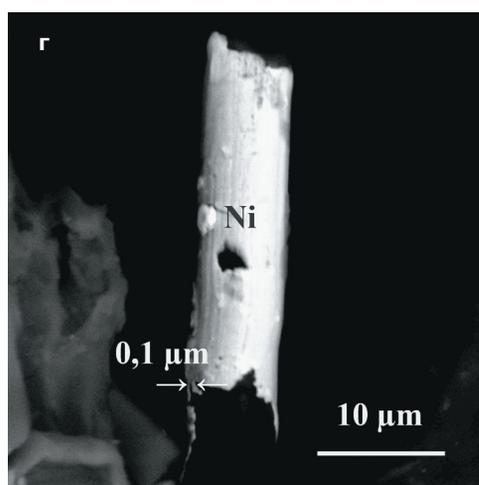
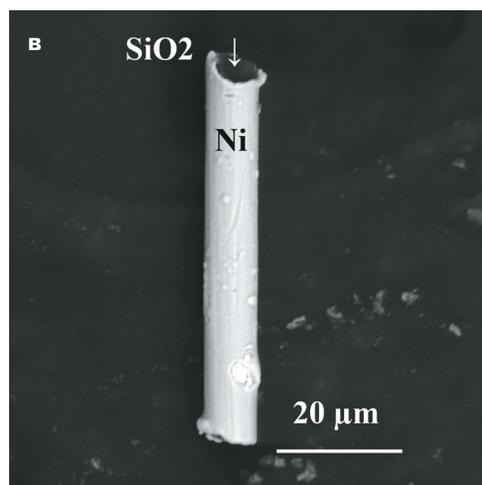
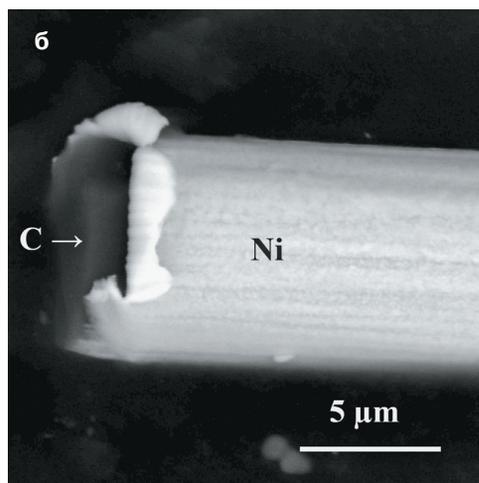
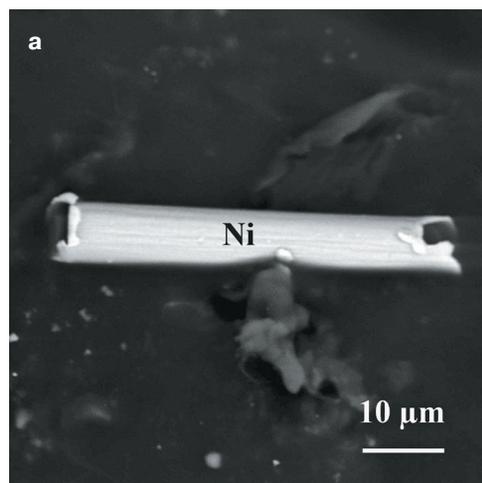


Иллюстрация из статьи: В. А. Цельмович, А. Ю. Куражковский, А. Ю. Казанский, А. А. Щетников, Т. А. Бляхарчук, Д. А. Филиппов. Исследования динамики поступления космической пыли на земную поверхность по торфяным отложениям. //Физика Земли, 2019, № 3. С. 1—11.

ного события, очень похожи. Я имею в виду три космических события — Тунгусское, Учурское космическое тело и событие, случившееся пять тысяч лет назад. Более того, произошедшее пять тысяч лет назад событие было отмечено в исследовании независимой группы хабаровских учёных под руководством Алексея Юрьевича Пескова, сейчас он директор Института тектоники и геофизики. Своими руками, своей техникой, на своих торфяниках они

получили примерно такой же результат, что и мы с коллегами. Конечно, было бы интересно изучить и другие торфяники, но, к сожалению, РФФИ прекратил финансирование этих проектов.

— А Челябинским метеоритом вы не занимались?

— Занимался, и очень детально. На эту тему издана книга в 600 страниц текста, из них 34 страницы — наши работы. Меня

интересовали механизмы, лежащие в основе формирования магнетитовых космических шариков. В результате удалось понять следующее. Когда летит какое-то космическое тело, то оно нагревается, но не целиком — нагревается только тонкий поверхностный слой. Благодаря процессу абляции, то есть сдувания, из троилита образуются такие шарики. Троилит — это соединение железа и серы, при этом сера уходит в атмосферу, а из оксида железа получается магнетитовый шарик размером 5—50 мкм с характерной микроструктурой поверхности. Подобные шарики сопровождают полёт всех метеоритов, они были обнаружены и в снегу по трассе пролёта Челябинского метеорита.

— Считается, что космические события имеют определённую периодичность: чем крупнее катастрофа, тем реже, и наоборот. Сто лет назад произошло тунгусское событие. Не означает ли это, что нам пора готовиться к новой катастрофе? Чем можете нас успокоить или, наоборот, испугать?

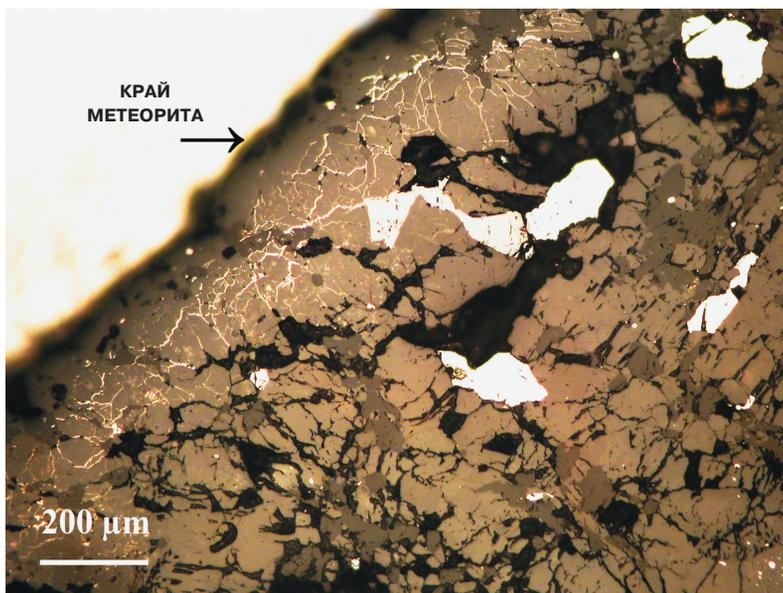
— Успокаивать или пугать не является моей задачей. Моя задача — регистрировать факты. Что касается периодичности, то говорят, что катастрофы, аналогичные тунгусской, случаются примерно раз в миллион лет. Хотя есть и другие оценки. После падения Челябинского метеорита, который, скажем прямо, прозевали, огромное количество людей работает над тем, чтобы обнаружить приближающиеся метеориты как можно раньше. Нам обещают в 2029 году пролёт достаточно крупного небесного тела, астероида Апофис. Пока непонятно, как далеко от нас он пролетит, но к этому моменту его орбиту можно будет скорректировать, а к 2036 году, когда он будет пролетать ближе, появятся технологии по его дезактивации. Их пока ещё нет, но они уже отрабатываются и вполне реальны.

— Что ещё можно узнать, изучая ископаемую космическую пыль?

— Наши исследования носят мультидисциплинарный характер. Сейчас в рамках Российского научного фонда идёт работа по археологическому проекту. Занимаясь изучением осадков из неандертальской пещеры в районе Нальчика, я выяснил, что космическая пыль там тоже присутствует. Там вообще очень много гротов и пещер, и



Фотография фрагмента Челябинского метеорита с характерным поверхностным обожжённым слоем. Внизу приведена микрофотография анилифа, сделанная при помощи оптического микроскопа Olympus BX51.



группа питерских археологов уже не один десяток лет их изучает. Им была важна климатическая составляющая, и моя задача заключалась в том, чтобы показать, как менялся климат. Когда холодало или, наоборот, теплело, состав минералов, которые извергались из кавказских вулканов, менялся. Удалось установить, что был тёплый период, и тогда неандертальцы приходили в эту пещеру, а был холодный, и тогда они уходили. По минералам это видно. Оказалось также, что в некоторых слоях космическая пыль видна очень хорошо. Очевидно, в это время там был ледник, куда ничего, кроме космической пыли, не попадало. Её концентрация там исключительно высока. Благодаря тому, что поток космической пыли примерно одинаков, она является своеобразным стратиграфическим репером.

— *Получается, что фундаментальные исследования космической пыли могут многое рассказать и об истории нашей планеты.*

— Это правда. Хотя мнения учёных, как обычно, расходятся. В мае нынешнего года в онлайн-режиме состоялась крупная конференция по минералогии, и по части космической пыли там разгорелась дискуссия настолько горячая, какой я не припомню ни на одной очной конференции. У меня собрана, наверное, самая большая в мире коллекция по объектам, содержащим космическую пыль, — около сотни объектов, десятки тысяч анализов. Но есть учёные, у которых наши результаты вызывают сомнения. Они считают, что это либо вулканическая, либо техногенная пыль, либо вообще полная ерунда, потому что вещество на Земле и в космосе примерно одинаковое. «Драка» идёт нешуточная, и это побуждает искать некие механизмы доказательства того, что объекты, которые мы находим, — это действительно космическая пыль.

— *Что для вас является наиболее бесспорным доказательством того, что эта пыль имеет космическое происхождение?*

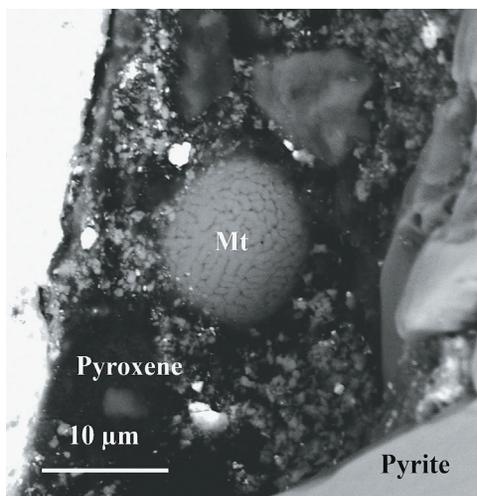
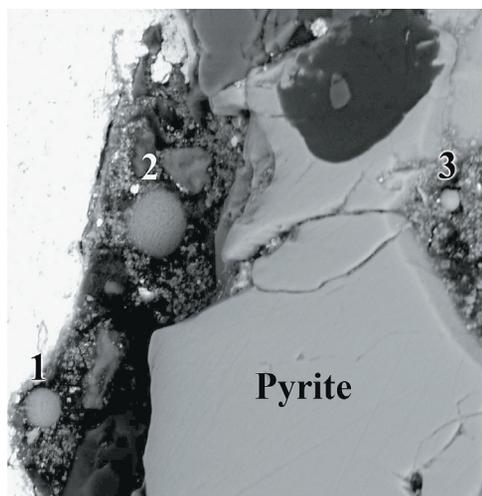
— Наличие характерных структур. Первая группа частиц — это магнетитовые шарики с характерной микроструктурой, которая возникает в условиях длительного

остывания. По сути, это микрометеориты, которые могли прилететь откуда угодно. А чтобы определить, откуда именно они прилетели, нужны дополнительные исследования на приборах, которые, надеюсь, скоро появятся у американцев. Тут нужны уже не микрозондовые исследования, а наноразмерные, тонкие изотопные исследования.

Вторая группа частиц — это частицы чешуйчатого железа. Мне удалось детально их изучить. Для этого я взял очень много торфа. Обычно для выделения магнитных микрочастиц, включая магнетитовые шарики, достаточно нескольких кубических сантиметров торфа. Я взял ведро и выделил шарики оттуда. Кроме шариков, выпало огромное количество самородного железа. Откуда оно в торфянике, ведь рядом нет ни вулканов, ни техногенных объектов? Когда я задаю этот вопрос, противники замолкают.

Вообще, странным образом, моими работами интересуются многие люди. Наши с соавторами научные публикации и читаемы, и цитируемы. Поэтому мне приносят для исследования разные объекты. Честно говоря, нередко приносит всякую ерунду.

По-настоящему интересным результатом был получен, когда я начал изучать объект, предложенный мне белорусской коллегой Ларисой Павловной Максе, которая занимается изучением трепела. Трепел — это осадочная порода, образовавшаяся в период от 30 до 60 миллионов лет назад. Тогда на территории нынешней Белоруссии плескалось мелкое море и на дне формировались осадочные отложения, постепенно преобразовываясь в осадочные породы. Трепел как осадочная порода находит разные полезные применения, в частности, как кормовая добавка в птицеводстве. При производстве добавки применяются магнитные технологии очистки — то есть трепел пропускают через мощные неодимовые магниты, потом их очищают и примеси выкидывают. Пытливая Лариса Павловна не стала всё это выкидывать, а посмотрела под микроскопом. Увидела шарики, стала искать соответствующую литературу. По статьям нашла меня и прислала образцы. Выяснилось, что эти частицы — магнетитовые шарики, чешуйчатое железо, наноалмазы и так далее, — они что в торфе, что в трепеле абсолютно одинаковые. Это ли не довод? Ведь



Три магнетитовых «космических шарика» (на фото магнетитовые зоны обозначены цифрами 1, 2 и 3), вплавленные в пироксен во время полёта метеорита. По-видимому, эти шарики были образованы из пирита и окислены до магнетита. Справа — фрагмент зоны 2.

трепел образовался десятки миллионов лет назад, а торф сформировался совсем недавно, десятки тысяч лет назад. Но набор частиц, которые мы относим к фоновой компоненте магнитной космической пыли, везде один и тот же.

— Владимир Анатольевич, мы говорили о вымирании динозавров и изменении биосферы из-за вулканических и импактных катастроф. Но такие события не могли повлиять на наших предков?

— Да, могли. Примерно 12 800 лет назад произошло событие, которое привело к тому, что на территории нынешней Америки образовалось большое количество эллипсоидных образований. Они называются «заливы Каролины». Природа этих образований до сих пор неясна. Один из наших коллег, Виталий Шеремет из Род-Айлендского университета в США, отобрал образцы из нескольких «заливов Каролины», а я нашёл там никель, что говорит о том, что, очевидно, это была очень большая комета, которая, по сути, смела существовавшую там цивилизацию. Подобных следов нет нигде в Европе. Планировалось изучить и другие «заливы Каролины», но в этом году экспедиции помешала пандемия.

Другое событие, 535 года нашей эры, скорее всего, уже не космогенное, а вулкано-генное. Можно сказать, совсем недавно.

Меня ещё со школьных времён волновал вопрос: есть античный мир, а потом вдруг какой-то провал — и сразу раннее христианство, Средневековье. Куда же подевалась мощная античная цивилизация? Так вот, в это время произошло пылевое событие, связанное с извержением вулкана, причём пыли было выброшено такое невероятное количество, что не было видно Солнца на протяжении двух лет. Это событие изучают многие исследователи, и мнения о причинах катастрофы разные. Я же решил поискать его следы в торфе. Уже первый наш местный торфяник помог обнаружить структуры, характерные для вулканической пыли.

Сейчас мне хотелось бы достойно систематизировать уже начатые работы, что в наше время непросто. Мы научились работать с торфом, с болотами. Это очень интересная, уникальная, поистине неисчерпаемая тема, которая помогла бы многим событиям локализовать. Но для этого нужны экспедиции. А экспедиции стоят денег. Денег на инициативные проекты, увы, нет. К сожалению, процессы, происходящие в науке, говорят о том, что поводов для оптимизма у нас очень мало. Но мы продолжаем надеяться.

Редакция благодарит Владимира Анатольевича Цельмовича за предоставленные иллюстрации.