



Железо из космоса

Д.М. ПЕЧЕРСКИЙ,
доктор геолого-минералогических наук
ИФЗ РАН

В статье обобщены первые результаты изучения с помощью термомагнитного анализа распределения частиц металлического железа в осадках разного возраста. Установлен ряд закономерностей, отражающих неоднородность космической

пыли: а) четкое разделение частиц железа на две группы: во-первых, на содержащую и не содержащую частицы железа и, во-вторых, на содержащую чистое железо и железо с небольшой примесью никеля; б) обнаружено глобальное обогащение части-

цами железа осадков, возраст которых 12–13, 64–66, 84–86 и 94–96 млн лет с постоянной величиной примеси никеля 5–6%; в) частицы сплава, содержащего более 20% никеля, не имеют отношения к космической пыли и связаны с падением метеоритов.

КАПЕЛЬКА ИСТОРИИ

Откуда возникла задача изучить распространение частиц космического железа в осадках? Из очень модной ныне темы – отчего вымерли динозавры и не только динозавры (см., например, Земля и Вселенная, 2010, № 3). Значительная часть исследователей полагает, что из-за падения на Землю огромного астероида. А это должно было отразиться в космических компонентах, попавших в осадки. И вот большая группа исследователей из раз-

ных институтов и даже разных стран во главе с А.Ф. Грачёвым принялась искать эти компоненты, а именно изучать подробно тоненький слой осадка на самой границе мезозоя и кайнозоя (65,5 млн лет назад) в Гамсе (Австрия) и в других местах. Нет, не получилось вымирания живых организмов во время падения того самого астероида. Получилось, что главная причина существенного уничтожения жизни на Земле (примерно половина) в мощном плюмовом* вулканизме этого времени. А астероид упал на

Землю несколько позднее... Об этом написана не одна статья, в том числе в “Земле и Вселенной” (2006, № 1), и даже монография. Но данная статья вовсе не об этом. Дело в том, что при таких исследованиях мы, естественно, столкнулись с различными материалами – “пришельцами из космоса”, в частности с частицами металлического железа, никеля. Тогда и возникла идея применить для массового изучения распространения частиц железа **термомагнитный анализ** (ТМА). И, конечно, захо-

* Плюм – это сильно разогретая огромная масса мантийного вещества, поднимающаяся от самого ядра Земли и извергающаяся на большой территории в виде мощного вулканизма.





телось с помощью такого простого и быстрого метода, как ТМА, посмотреть на закономерности распространения в пространстве и времени частиц металлического железа. В дальнейшем были существенно расширены интервал времени и число объектов. Так как я геофизик – палеомагнитолог и петромагнитолог, то захотелось узнать, нет ли какой-либо связи в накоплении частиц железа с особенностями в поведении геомагнитного поля. Такую информацию можно получить благодаря палеомагнитным данным. К сожалению, явной связи не обнаружилось. Но результаты первых исследований такого рода все равно интересны, хотя бы потому, что они первые...

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОМАГНИТНОГО АНАЛИЗА

По данным многих измерений непосредственно в пылевых космических облаках, в атмосфере, во льду и снеге, в осадках обнаруживается космическая пыль, содержащая частицы металлического железа* и никеля. При этом сведения об их распределении на поверхности Земли и во времени весьма ограничены, так как использовались лишь “прямые”

методы фиксации частиц, когда из большого объема материала – льда, снега, осадка, облака космической пыли и т.п. – извлекались ловушкой, промывкой, магнитной сепарацией и другими способами частицы железа. Затем анализировались, например с помощью микрозонда, их состав, структура и т.п. Такие методы требуют большого объема материала. В результате получают осредненные данные, и число таких данных невелико.

Обширную и оперативную информацию о распределении металлического железа можно получить по данным термомагнитного анализа. Термомагнитный анализ – это определение температур перехода ферромагнитного материала (например, железа) в парамагнитное состояние в ходе нагрева. Такие температуры называются точками Кюри (T_C). Точка Кюри – фундаментальная характеристика магнитного материала, зависящая от его состава и строения кристаллической решетки. В магнитных минералах, содержащих примеси, не меняющие их кристаллическую структуру, точка Кюри является однозначной функцией состава магнитного минерала.

Главные достоинства ТМА по сравнению с другими методами исследования вещества:

- получение информации о минералах, содержащихся в горной породе, без их извлечения,
- очень высокая чувствительность (достаточно присутствия в породе менее 0,00001% железа и т.п. минералов),
- простота приготовления образцов (берется кусочек произвольной формы массой 0,1 г и меньше),
- быстрота анализа (примерно 10 мин на один анализ).

ТМА широко применяется в палеомагнитных и петромагнитных исследованиях различных геологических объектов, в том числе осадков. Главная цель таких измерений – выяснение природы основных носителей палеомагнитной записи. Соответственно температура ТМА, как правило, ограничивалась точками Кюри главных носителей такой информации – магнетита и гематита, то есть максимум около 700 °С, тогда как точки Кюри железа с небольшими примесями никеля составляют 700–770 °С. В результате информация о зернах металлического железа полностью пропадала.

Повышение температуры ТМА до 800 °С, то

* Здесь и далее, говоря о частицах железа, я имею в виду как чистое железо без примесей, так и частицы сплава, содержащие менее 20% никеля.





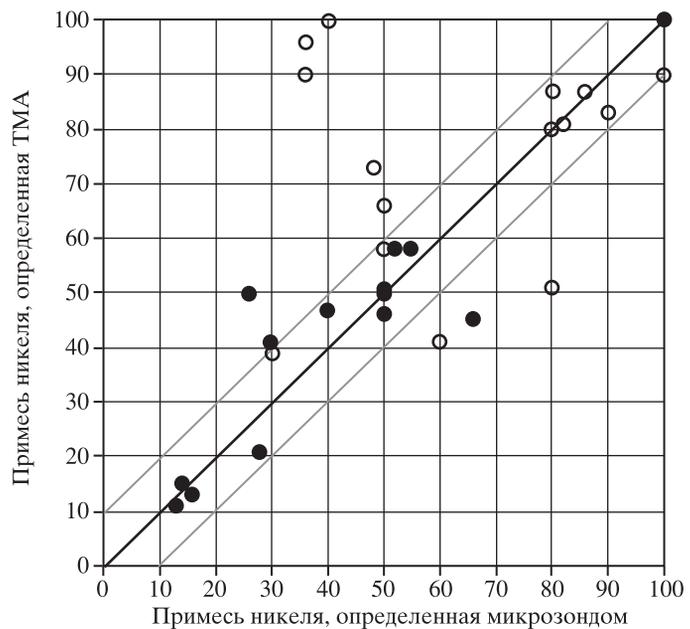
Сравнение составов частиц железа и Fe–Ni сплава с определениями по линейной зависимости “точка Кюри – примесь никеля”. Залитые кружки – образцы метеоритов и металлических частиц из осадков, полые кружки – образцы искусственных Fe–Ni сплавов.

есть всего на 100° , дало возможность наблюдать детальную картину распределения частиц металлического железа в пространстве и времени, чем и занялась лаборатория геомагнетизма ИФЗ РАН совместно с палеомагнитной лабораторией Казанского университета. ТМА проводился с помощью высокочувствительных экспресс-весов Кюри.

Известно, что в частицах космического железа основная примесь – это никель. Зависимость точки Кюри сплава железа и никеля должна быть близка линейной, и содержание никеля определяется простой формулой:

$Ni (\%) = 0,243 (770 - T_C)$, где 770 – точка Кюри чистого железа, T_C – точка Кюри образца.

Однако у сплавов, содержащих примесь никеля более 20%, из-за структурных изменений точки Кюри могут существенно отклоняться от линейной зависимости. Проверим, во-первых, насколько применима оценка содержания при-



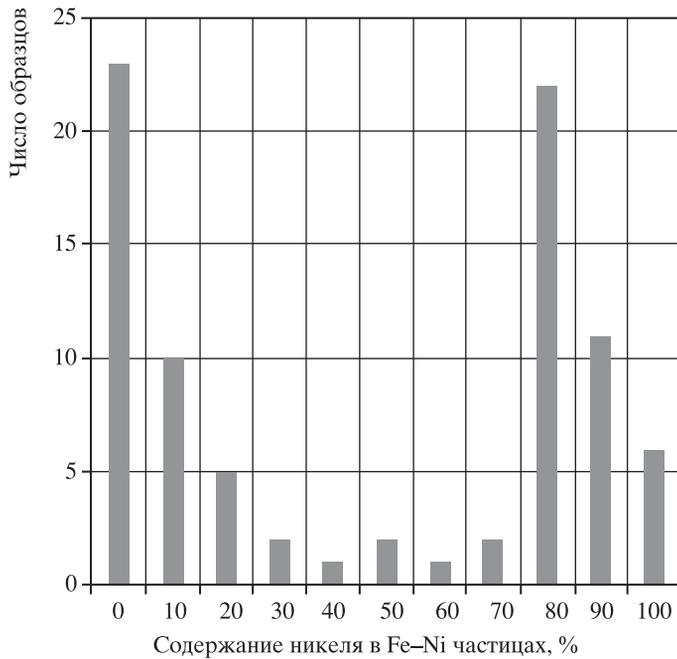
меси никеля по линейной зависимости T_C –Ni к природным метеоритам и космическим частицам, содержащим Fe–Ni сплавы, и, во-вторых, насколько широко распространены в космической пыли частицы Fe–Ni сплава с примесью никеля больше 20%.

Для ответа на первый вопрос я использовал публикации Т. Нагаты, М. Фунаки (1986, 1987) и А.Ф. Грачёва (2009), где приводятся данные микрозондового анализа и ТМА для металлических метеоритов и металлических частиц из осадков. Добавим информацию из справочников о составе и точках Кюри стандартных марок Fe–Ni сплавов (инвар, пермаллой и др.). Выясняется, что заметные отклонения от линейной зависимости

встречаются главным образом среди искусственных сплавов с содержанием никеля между 20 и 80%.

Ответ на второй вопрос я нашел в статьях Д.Е. Броунли (1987), А.Ф. Грачёва (2009), Д.У. Паркина (1964), М. Шимы и Х. Ябуки (1988) и других исследователей. В них есть сведения о составе металлических частиц в космической пыли во льдах Антарктики и Гренландии, в осадках океана, в осадках из района Тунгусской катастрофы, в осадках Гамса и других объектах. По этим данным, космические частицы, содержащие никель между 20 и 80%, очень редки. Для остальных же вполне приемлема оценка содержания никеля по линейной зависимости T_C –Ni.



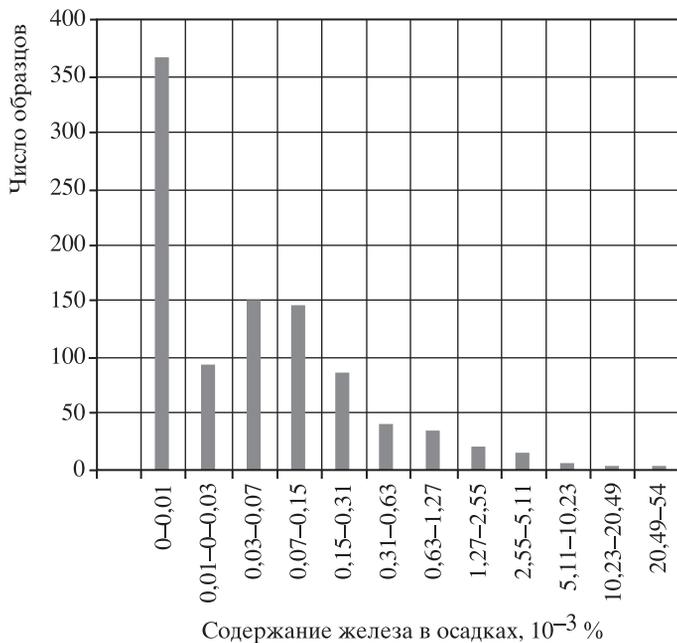


Гистограмма содержания никеля в Fe-Ni частицах из космической пыли. Повышенное количество частиц, содержащих более 80% никеля, относится фактически к одной "точке" из разреза Гамс (Австрия), то есть это явление сугубо локальное.

В наших экспериментах точность определения точки Кюри составляет примерно 10%, чему соответствует содержание никеля в сплаве 2–2,5%, то есть можно принять, что ошибка каждого определения не превышает 3%. Недостатки в применении линейной зависимости T_c -Ni и точно-

сти ТМА компенсируются простотой приготовления проб и их ТМА, быстротой и массовостью получения данных.

После вводно-методического вступления обратимся к собственно результатам определения по ТМА концентрации частиц космического железа и содержания в них примеси никеля в осадках миоценового (9–17 млн лет назад) и мелового (62–130 млн лет назад) возраста из 15 разрезов Австрии (Гамс), Грузии (Квиринаки и Тетрицкаро), Казахстана (Кошак), Крыма (Верхоречье и Сельбухра), Поволжья (Ключи и Тепловка), Северного Кавказа (Аймаки, Басс, Гергебиль, Дженгутай и Маджалис) и Туркмении (Кара-Кала и Халац). Расстояния между объектами исследования достигают 1–3 тыс. км, что позволяет говорить о глобальном характере накопления космических



Сводная гистограмма содержания железа в изученных осадках.

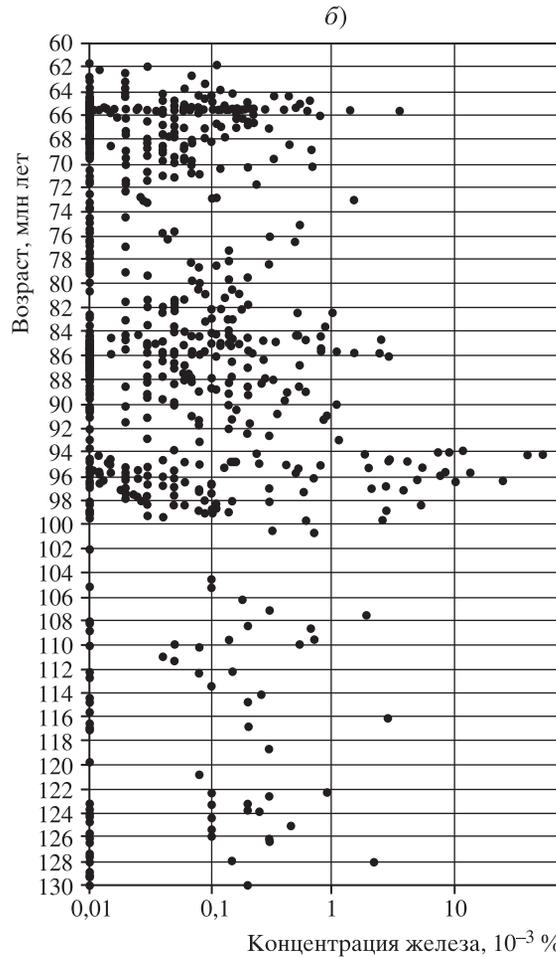
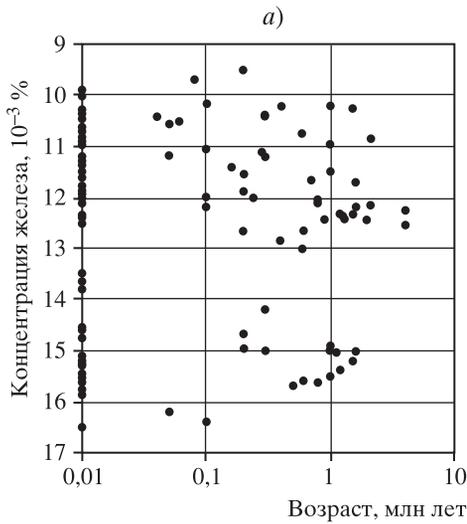


График концентраций железа в миоценовых (а) и меловых (б) осадках (сумма данных).

частиц в осадках близкого возраста.

СОДЕРЖАНИЕ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ
В ОСАДКАХ

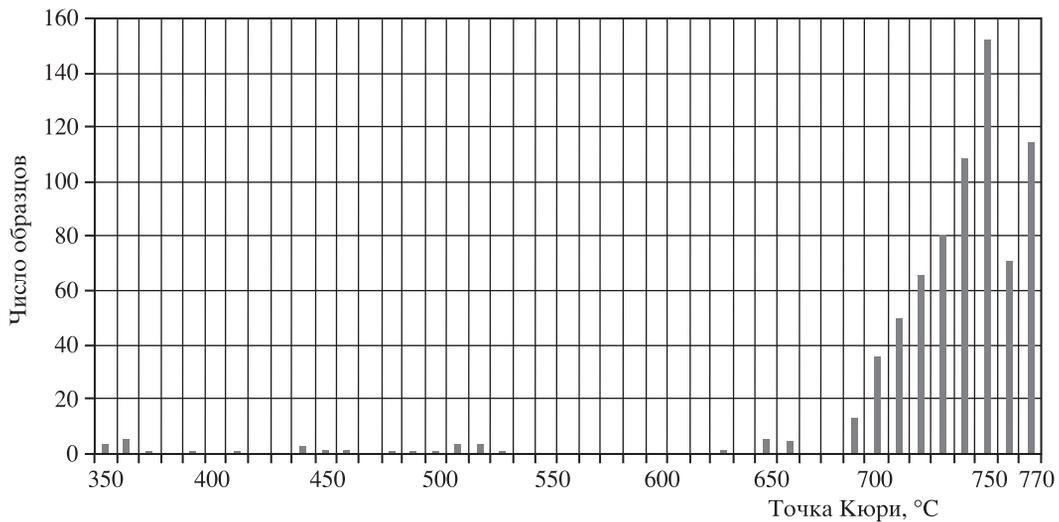
Частицы металлического железа обнаружены в 521 образце из 901 изученного, их содержание широко варьирует от 10^{-5} % до 0,05%. Независимо от возраста концентрация частиц железа образует две группы. Первую группу можно назвать “нулевой” – это осадки, в которых железо практически отсутствует

(не обнаружено ТМА). Во второй группе сосредоточены осадки, содержащие железо преимущественно от $0,03 \times 10^{-3}$ % до $0,3 \times 10^{-3}$ %.

Такое распределение частиц на две группы носит закономерный глобальный характер, оно наблюдается во **всех** изученных объектах. Бимодальное распределение я объясняю следующим образом. Облако космической пыли и падающие из него на Землю частицы – это как туча, из которой капает дождь.

Число частиц в космической пыли конечное, по существующим данным, их более 60 тыс. в одном кубическом метре. Это значит, что из десяти кубических сантиметров только в один попадет частичка космической пыли, которая падает на сплошной слой осадка. Соответственно, во многих исследованных нами образцах просто отсутствуют частицы космической пыли, они и образуют “нулевую” группу на гистограмме. Вторая же группа отражает





Гистограмма распределения точек Кюри частиц железа Fe–Ni сплава в осадках (сумма данных).

действительное распределение частиц железа в осадках, выпавших из космической пыли.

Можно говорить о четырех типах накопления металлического железа: точечное, локальное, региональное и глобальное.

Главный интерес, конечно, представляют случаи регионального и глобального накопления железа. Отмечу самые заметные:

12–13 млн лет назад интервал находится внутри стратиграфического яруса миоцена, то есть не связан ни с какими заметными геологическими событиями. Это время характеризуется высокой частотой инверсий геомагнитного поля – 8 инверсий за миллион лет;

64–66 млн лет назад интервал включает границу Мезозойской и Кайнозойской геологических

эр. Частота инверсий – 2 инверсии за миллион лет;

84–86 млн лет назад интервал охватывает один ярус позднего мела. Он совпадает с верхней границей длительного существования геомагнитного поля без инверсий (так называемый гиперхрон Джалал);

94–96 млн лет назад интервал находится внутри стратиграфического яруса позднего мела и внутри гиперхрона Джалал, соответственно частота инверсий геомагнитного поля равна нулю.

Повсеместное распространение частиц железа, глобальный характер отмеченных выше интервалов повышенного содержания железа, отсутствие общих земных геологических и/или геомагнитных закономерностей в накоплении частиц космического железа – все это свиде-

тельствует о главном их **внеземном** источнике – **космической пыли**.

В отличие от повсеместного распространения частиц железа частицы Fe–Ni сплава с высокими содержаниями никеля встречаются очень редко и имеют сугубо локальное распространение. Отсутствие корреляции между их содержаниями объясняются разным их происхождением. Если первые – в основном продукты выпадения на Землю космической пыли, то вторые, скорее, связаны прямо или косвенно с падающими на Землю метеоритами. Во всяком случае, можно однозначно утверждать, что в космической пыли концентрация частиц Fe–Ni сплава ниже 10⁻⁵% (ниже чувствительности ТМА).



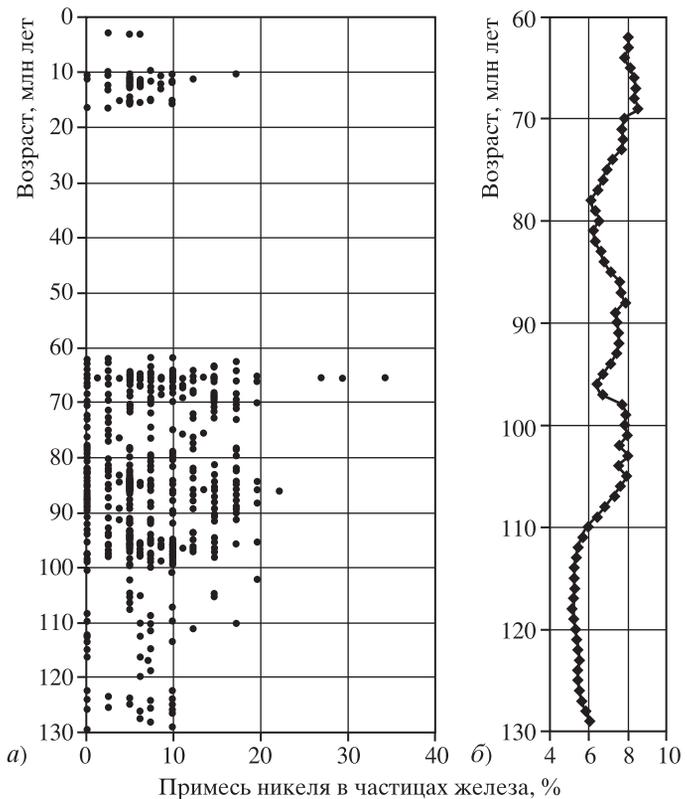


График примеси никеля в частицах железа в зависимости от возраста осадков: сумма данных (а) и результат их сглаживания (б). Интервал сглаживания – 9 млн лет, шаг – 1 млн лет.

СОСТАВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

Вариации состава частиц железа, выраженные в их точках Кюри, изменяются во всех разрезах примерно в одних пределах – от 680 °С до 780 °С, что соответствует примеси никеля от 22% до нуля. Причем начиная с $T_C = 680$ °С и ниже резко падает число случаев вплоть до нуля, то есть частиц, содержащих примесь никеля от 22 до 100%, очень мало в осадках и, соответственно, в космической пыли.

Частицы железа по содержанию в них примеси никеля образуют две группы (не считая “хвоста” в интервале 360–680 °С): чистое железо без примеси никеля и группа с $T_C = 750$ °С (5% никеля) и плавным спадом до 700 °С (17% никеля). Такое разделение частиц на две группы, очевидно, свидетельствует о разных источниках чистого железа и железа с примесью



никеля. Вторая группа вполне подтверждается данными о составе металлических включений в метеоритах и частиц космической пыли. Группа чистого железа очень похожа на частицы ме-

таллического железа из лунного материала (вулканического стекла, базальтов и брекчий), доставленного экипажами КК “Аполлон-11 и -12”. По данным микросондового анализа, металлические

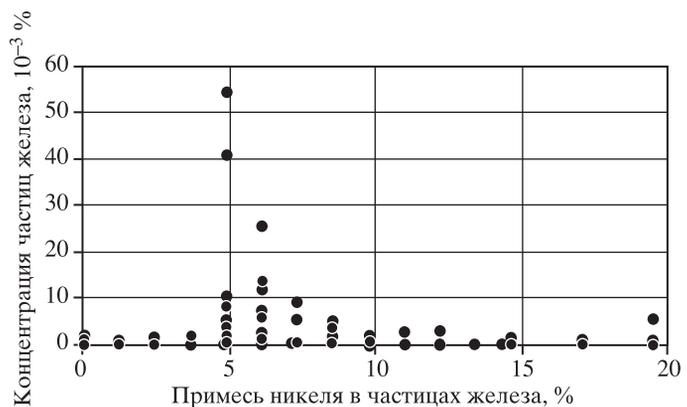


График сопоставления концентраций частиц железа в осадке с примесью никеля в частицах железа (сумма данных).





частицы состоят из практически чистого железа. Точки Кюри их чаще всего близки к 770 °С. Вполне вероятно, что это специфика лунных магматических пород. В то же время в обломках метеоритов, подобранных на Луне во время миссий “Аполлонов”, присутствуют обычные для металлических метеоритов Fe–Ni сплавы с высоким содержанием никеля. В многочисленных сферулах (продукты падения метеоритов на Луну) содержание никеля варьирует от менее 1% до 20% и более.

В частицах железа большой разброс примесей никеля. При сглаживании примеси никеля

варьируют в пределах 6–8%, то есть в пределах погрешности среднего содержания никеля постоянно во времени. Постоянство среднего состава частиц железа, видимо, характеризует постоянство состояния облака космической пыли. При этом в четырех интервалах глобального обогащения осадков частицами железа явно преобладают частицы второй группы, то есть содержащие примеси никеля. Число случаев чистого железа невелико и разное в разных интервалах. Следовательно, частицы чистого железа не имеют отношения к интервалам обогащения

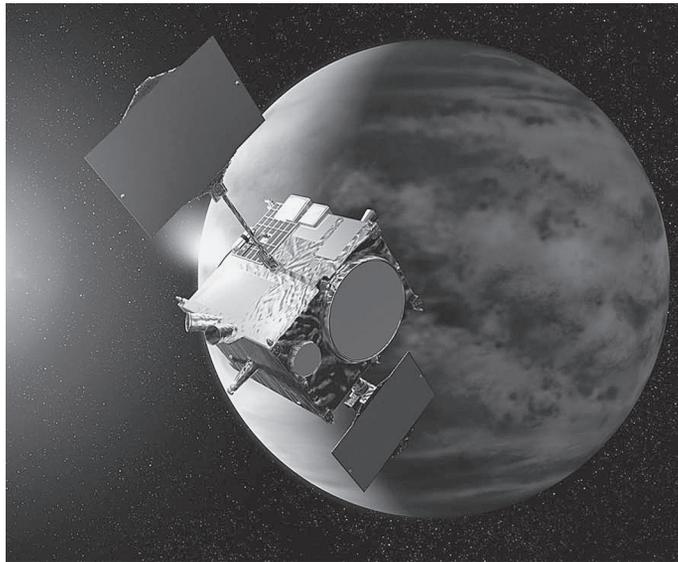
осадков частицами железа.

Посмотрим, есть ли корреляция содержания частиц железа с содержанием в них примеси никеля. Коэффициент корреляции между ними равен $-0,024$, то есть связь отсутствует. На этом фоне наблюдается явный пик повышенного содержания железа с практически постоянной примесью никеля 5–6% независимо от места и возраста осадка, содержащего железо. Это явно глобальный эффект, очевидно, характеризующий главный источник космической пыли – разрушенные планеты, астероиды и т.п.

Информация

Япония запустила к Венере две АМС

20 мая 2010 г. в 21 ч 58 мин 22 с по Гринвичу со стартового комплекса Йошинобу космодрома Танегасима (Япония) стартовала РН “Н-2А” (№ F-17) с АМС “Акацуки” (“Akatsuki”, или “PLANET-C”) и экспериментальным КА “Икар” (“Ikaros”) на борту. Через 27 мин после запуска АМС “Акацуки” отделилась от последней ступени ракетно-носителя, а спустя 18 мин – “Икар”, они вышли на гелиоцентрическую орбиту. В качестве попутного груза



Японская АМС “Акацуки” исследует Венеру. Рисунок JAXA.

на околоземную орбиту высотой 290×305 км доставлено три микроспутника

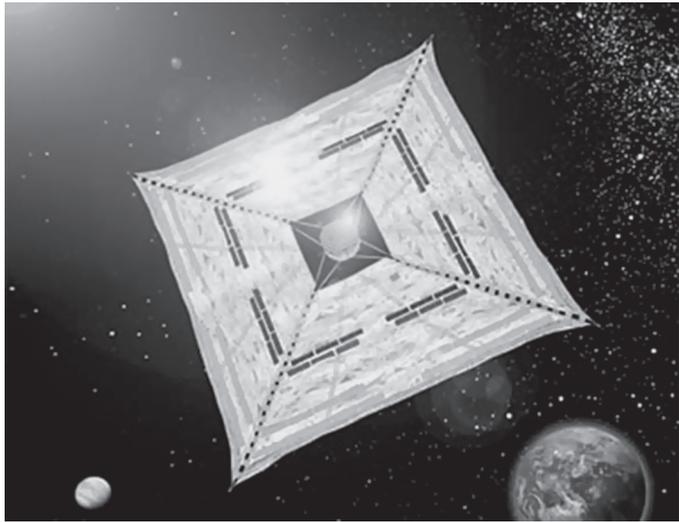
массой по 1 кг: “Hayato” (“KSAT”, создан в Университете Кагосима), “Negai”





(Университет Сока) и “Waseda-Sat-2” (Токийский университет).

Первая японская АМС “Акацуки” (рассвет) для исследования Венеры создана в Институте космических и астронавтических наук (Institute of Space and Astronautical Science, ISAS) Японского космического агентства (JAXA). Станция размером $1,04 \times 1,45 \times 1,40$ м и массой 500 кг снабжена двумя панелями солнечных батарей общей площадью $2,8 \text{ м}^2$ и мощностью 1200 Вт. На ней установлено шесть приборов общей массой 37 кг: три УФ-камеры и ИК-камера исследуют средние и нижние слои облачности Венеры в разных участках спектра (распределение углекислого газа и соединений серы, обнаружение паров воды в атмосфере), камера свечения неба (наблюдение молний) и очень стабильного осциллятора (радиоастрономическое измерение структуры атмосферы). “Акацуки” займется непрерывным мониторингом атмосферных процессов Венеры, то есть станет первым метеоспутником этой планеты. Станция предназначена для изучения климата, атмосферы и поверхности Венеры. Она должна достичь планеты в декабре 2010 г. и выйти на эллиптическую орбиту ИСВ высотой 300×80 тыс. км. Орбита выбрана таким образом, чтобы на каждом витке угловое движение КА в те-



Космический аппарат с солнечным парусом “Икар” (Япония). Рисунок JAXA.

чение 20 ч было синхронизировано с суперротацией атмосферы Венеры, что позволит непрерывно отслеживать изменения в структуре облачных слоев. Программа рассчитана на четыре года. В течение первых двух лет “Акацуки” будет работать во взаимодействии с европейской АМС “Венера Экспресс”, которая уже четыре года исследует Венеру (Земля и Вселенная, 2006, № 3; 2009, № 6).

Космический аппарат с солнечным парусом “Икар” (“Ikaros”, Interplanetary Kitecraft Accelerated by Radiation of the Sun – межпланетный парусный аппарат, движущийся за счет солнечного излучения) массой 310 кг оснащен тончайшей мембраной из полиамидной фольги толщиной 7,5 мкм и

массой всего 13 кг. Парус развернулся в космосе (размер 14×14 м), на нем укреплены тонкопленочные солнечные батареи для энергопитания, устройства управления полетом и сенсоры космической пыли. С его помощью планируется исследовать особенности движения аппаратов с помощью солнечного ветра. После раскрытия паруса от “Икара” отделился маленький субзонд с фотокамерой, чтобы сделать снимки аппарата и паруса в развернутом состоянии. “Икар” летит вслед за АМС “Акацуки” и должен долететь до Венеры за семь месяцев.

Пресс-релиз Японского космического агентства и ISAS,
21 мая 2010 г.





Информация

Бурение ледниковой шапки Эльбруса

Ученые Института географии РАН впервые в мире, в рамках Международного полярного года, выполнили бурение льда в привершинной области высочайшей вершины Европы Эльбруса. В необыкновенно трудных условиях на высоте 5115 м за 11 дней непрерывной работы в августе и сентябре 2010 г. гляциологи достигли ложа ледниковой шапки и получили керн длиной более 181 м. О первых результатах исследований и планах на будущее рассказал в своей статье, опубликованной в журнале “Лед и снег”, руководитель экспедиции доктор географических наук В.Н. Михаленко. Керн, уникальное хранилище информации о климате прошлых эпох, позволит ученым восстановить климат Северного полушария за последнюю тысячу лет.

Полученные до сего времени в Антарктиде и Гренландии ледниковые керны помогли реконструировать историю климата Земли за последние 700 тыс. лет. Но реконструкции отражают крупномасштабные измене-

ния климата, затрагивавшие всю планету.

Климатологов больше интересует, что же происходило с климатом прошлых эпох на региональном уровне, например в умеренных широтах Северного полушария. Для решения этого вопроса высокогорное бурение незаменимо. С точки зрения высоты и своего расположения Западное плато Эльбруса идеально подходит для бурения. Поскольку этот достаточно обширный (0,5 км²) и горизонтальный участок на поверхности Эльбруса труднодоступен, ранее он не исследовался. С запада плато открыто для воздушных масс, приносящих снежные осадки. Слой за слоем в леднике записывается климатическая история многих тысячелетий.

Прежде чем приступить к расшифровке информации, нужно провести множество предварительных исследований. Необходимо узнать, как меняется температура внутри ледника. Если там происходит таяние, датировать слои очень трудно, а в некоторых случаях невозможно. Талые воды влияют и на изотопно-геохимический состав разных слоев. Гляциологи измеряли температуру льда в скважине уже после бурения и получения керна. На глубине затухания сезонных колебаний (примерно 10 м) температура составила -17°C . Такое низкое значение для данной широты возможно

только в высокогорных ледниках на большой высоте. Следовательно, таяние в леднике на Западном плато не происходит, и лед здесь формируется только за счет накопления снега.

Толщина самого ледника, как показали измерения на плато, достигает более 250 м. Радиолокационное зондирование позволило ученым составить карту рельефа ложа ледника. На ней видна воронка с довольно высокими бортами, напоминающая древний кратер вулкана.

При бурении на глубине 107,27 м обнаружен слой с кусочками вулканогенного материала, который может соответствовать последнему извержению одного из кратеров Эльбруса всего 400 лет назад. Для того чтобы точно ответить на вопрос, действительно это вулканический материал или, возможно, просто обломки горных пород, необходим геохимический анализ.

В ближайшее время ученые должны приступить к датировке керна, который хранится в холодной лаборатории на географическом факультете МГУ, а потом уже к анализу изотопного состава льда. Он покажет, каким был климат умеренных широт Северного полушария в последнем тысячелетии.

По материалам журнала “Лед и снег”, № 1, 2010, с. 123–126

