

ВИТИМСКИЙ МЕТЕОРИТ (25 сентября 2002 года) — РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В.С. Антипин, С.А. Язев*, А.Б. Перепелов, С.В. Ефремов, М.А. Митичкин, А.В. Иванов, Л.А. Павлова, Н.С. Карманов***, З.Ф. Ущাপовская****

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

** Иркутский государственный университет, 664033, Иркутск, ул. К. Маркса, 1, Россия*

*** Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия*

**** Геологический институт СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, ба, Россия*

25 сентября 2002 г. над Мамско-Чуйским и Бодайбинским районами Иркутской области наблюдался полет яркого болида, который сопровождался значительными световыми, звуковыми и электрофонными явлениями, а также воздушной волной. По данным зафиксированных американским спутником координат двух точек наблюдения и опроса многих очевидцев этого природного явления была реконструирована траектория падения метеорита. В предполагаемом районе падения метеорита в 2002—2003 гг. работали три экспедиции, основные результаты комплексных исследований которых изложены в данной статье.

Кроме экспедиций Иркутского научного центра СО РАН поисками метеоритного вещества занимались сотрудники Комитета по метеоритам РАН и группы ученых и студентов из Екатеринбурга и Красноярска. Ни одной из экспедиционных групп не удалось обнаружить кратеры либо следы падения метеорита, а также его фрагменты.

По материалам отобранных по трассе полета метеорита проб снегового покрова нами были обнаружены и исследованы электронно-зондовым методом минеральные частицы и сферулы, происхождение которых могло быть связано с космогенным веществом из дымно-пылевого абляционного следа метеорита. Наибольший интерес для исследований представляли полиминеральные сферулы и частица Ni-содержащего пирита, а также частица никелистого железа, состав которых по соотношению Fe и Ni соответствуют типичным минералам метеоритов — камаситу и тэните. Анализ таких минеральных образований показывает, что они не характерны для коренных пород и коры выветривания исследованной территории, а имеют, в частности, морфологическое сходство со сферулами (микрометеоритами) из льда Антарктиды. Важным аргументом в пользу метеоритного происхождения обнаруженного вещества являются также и совпадение места обнаружения метеоритов с установленными в ходе экспедиционных работ участками поврежденного и поваленного леса на проекции трассы их полета.

Болид, метеорит, абляционный след, электрофонные явления, метеоритное вещество, никелистое железо, сферулы.

THE 25 SEPTEMBER 2002 VITIM METEORITE: RESULTS OF COMPLEX RESEARCH

V.S. Antipin, S.A. Yazev, A.B. Perepelov, S.V. Efremov, M.A. Mitichkin, A.V. Ivanov, L.A. Pavlova, N.S. Karmanov, and Z.F. Ushchapovskaya

On 25 September 2002, a brilliant meteor over the Mama-Chuya and Bodaibo Districts of the Irkutsk Region was observed, which was accompanied by significant light, sound, and electrophonic phenomena as well as by an air shock wave. An U.S. satellite has recorded the coordinates of two observation points, and many eyewitnesses have testified to this natural phenomenon. On the basis of this information, the path of the meteorite fall has been reconstructed. In 2002–03, three expeditions explored the area where the meteorite had supposedly fallen. The main results of their complex research are reported in this paper.

In addition to the expeditions of the Irkutsk Scientific Center, experts from the Meteorite Committee of the RAS as well as teams of researchers and students from Ekaterinburg and Krasnoyarsk were engaged in the search for the meteorite matter. Neither of these groups succeeded in finding craters, or traces of fall, or fragments of this meteorite.

Examining the snow samples taken along the path of the meteorite flight, we have found mineral particles and spherules whose origin might be related to the cosmogenic matter precipitated from the smoke-dust ablation track of the meteorite and analyzed them using an electron microprobe. Of the greatest interest for study are polymineral spherules and a particle of Ni-bearing pyrites and nickel-iron, whose Fe and Ni proportions correspond to those of kamacite and taenite, typical minerals of meteorites. Analysis of these mineral formations shows that they are not typical of the bedrock and weathering crust of the study area but are, in particular, similar to the spherules (micrometeorites) from the Antarctic ice discovered in the purposeful search for meteorite matter. An important argument for the meteorite origin of the found particles is the fact that the localities where they were found during the expeditions coincide with the areas of damaged and down-thrown forest along the projected path of the meteor.

Bolide, meteorite, ablation track, electrophonic phenomena, meteorite matter, nickel-iron, spherules

ВВЕДЕНИЕ

В ночь на 25 сентября 2002 г. в 1 ч 56 мин по местному времени над Мамско-Чуйским и Бодайбинским районами Иркутской области наблюдался полет яркого болида, который сопровождался мощными световыми и звуковыми эффектами, а также воздушной волной, вызвавшей сотрясения, зафиксированные очевидцами. Поскольку никаких значимых разрушений и ущерба не было, информация об этом событии от администраций районов сразу не поступила. Лишь через неделю администрация г. Бодайбо сообщила о нем в Институт солнечно-земной физики СО РАН (г. Иркутск). После этого директор ИСЗФ СО РАН академик Г.А. Жеребцов сделал запрос в органы ГО МЧС и сообщил о наблюдавшемся болиде на севере Иркутской области в Комитет по метеоритам РАН. Затем обширная информация (иногда весьма недостоверная) об этом природном явлении стала поступать на страницы многих газет („Известия“, „Труд“, „Комсомольская правда“, „Аргументы и факты“, „Восточно-Сибирская правда“ и др.) и журналов („Итоги“). Кроме того, в Интернете появилось сообщение о регистрации болида спутником США. Яркое свечение было обнаружено на высоте около 62 км в точке с координатами 57,21° с.ш. и 112,90° в.д. Болид прослежен спутником до высоты приблизительно 30 км с координатами 58,21° с.ш. и 113,46° в.д. Реконструкция траектории падения по этим данным позволила оценить угол ее наклона к горизонту (примерно 34°). Поскольку предположения о природе этого события весьма противоречивые, мы сочли необходимым изложить в данной работе результаты научных исследований, проведенных сотрудниками Иркутского научного центра и Геологического института СО РАН и финансируемых СО РАН.

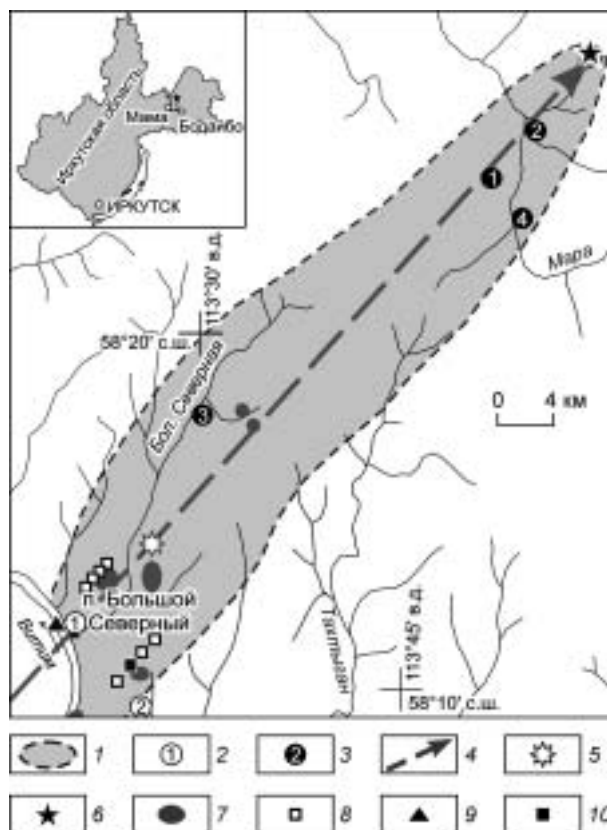
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Первая рекогносцировочная экспедиция в Мамско-Чуйском районе работала через месяц после падения метеорита и была организована ИСЗФ СО РАН и Иркутским государственным университетом (ИГУ) под руководством С.А. Язева. В ней приняли участие сотрудник астрономической обсерватории ИГУ Д.В. Семенов, а также московские и иркутские журналисты. Были опрошены более 30 очевидцев в поселках Мама, Луговка, Мусковит, Витимский, Большой Северный. Кроме того, экспедиции удалось провести предварительное обследование местности в районе трассы полета болида. Здесь были обнаружены отдельные свежесломанные стволы и ветки деревьев. Местные жители сообщили, что в этом районе, в долине р. Тахтыган, есть более мощные повреждения леса (рис. 1).

6—20 апреля 2003 г. в Мамско-Чуйском районе проводила исследования вторая экспедиция, организованная сотрудниками институтов Иркутского научного центра: ИСЗФ СО РАН, Института геохимии (ИГХ СО РАН) и Института земной коры (ИЗК СО РАН). В ней приняли участие С.А. Язев (ИСЗФ СО РАН), В.С. Антипин, С.В. Ефремов, М.А. Митичкин (ИГХ СО РАН), А.В. Иванов (ИЗК СО РАН) и студент ИГУ А.В. Лихошвай. Основная задача экспедиции заключалась в отборе проб снега в гольцовой части горного хребта вдоль трассы полета метеорита. По данным метеорологов, к моменту его падения снег на вершинах гор уже лежал (2—5 см), а через несколько дней после этого события здесь прошли обильные снегопады. Опрос очевидцев показал, что наутро в направлении трассы полета наблюдалось „...темная муть, как дым. Копоть была видна за горами, над горами. Небо было голубое с

Рис. 1. Схема района экспедиционных исследований и опробования снегового покрова в месте разрушения и предполагаемого падения Витимского метеорита.

1 — район экспедиционных исследований 2002—2003 гг.; 2 — зимние базы экспедиции 2003 г. (1 — пос. Большой Северный, 2 — устье руч. Березовый); 3 — летние базы экспедиции 2003 г. (1 — верховья левого притока р. Мара, 2 — устье руч. Мустар, 3 — устье руч. Упорный, 4 — правобережье верхнего течения р. Мара); 4 — проекция расчетной траектории полета метеорита; 5 — проекция точки вспышки, зафиксированной спутником США; 6 — предполагаемое место падения метеорита; 7 — районы наблюдаемых повреждений и вывалов леса; 8, 9 — места отбора: 8 — проб снегового покрова, 9 — фоновой пробы снега на льду р. Витим; 10 — место обнаружения сферул в пробах снегового покрова.



облаками, где-то шел снег, но ... муть была темной и отличалась по виду“. Следовательно, в самом нижнем слое снега могли сохраниться частицы космогенного вещества, осевшие из дымно-пылевого абляционного следа метеорита. В момент опробования толщина снегового покрова даже на вершинах гольцов превышала 1,5 м. Здесь выкапывались шурфы площадью 1 м² до поверхности мерзлого грунта, и в пробы отбирался нижний слой снега толщиной 10—15 см. Всего было взято 13 проб снега массой до 8 кг на вершинах разных гольцов с превышением 1000 м и более вблизи проекции трассы падения, включая фоновую пробу (снег со льда р. Витим). Следует подчеркнуть, что ледостав на реках района произошел после описываемого события. В фоновой пробе, которая характеризует весь разрез снегового покрова, образовавшегося в районе после полета метеорита в атмосфере (после становления льда на реке) и до времени пробоотбора, не содержится твердых частиц. После растапливания снега и фильтрации снеговой воды собранное на фильтрах твердое вещество было исследовано различными инструментальными аналитическими методами (рентгеноструктурный анализ, микрозондовые исследования) в Институте геохимии, Институте земной коры СО РАН (г. Иркутск) и в Геологическом институте СО РАН (г. Улан-Удэ). Лабораторные исследования выполнили сотрудники ИГХ СО РАН С.В. Ефремов, М.А. Митичкин, А.Б. Перепелов, Л.А. Павлова, сотрудники ИЗК СО РАН А.В. Иванов, З.Ф. Ущаповская, сотрудник Геологического института СО РАН Н.С. Карманов.

В ходе работ второй экспедиции были обнаружены множественные повреждения леса в районе трассы полета метеорита. Отмечены многочисленные обломанные вершины деревьев. Обнаружены отломанные ветки и даже поваленные (вывороченные с корнем) деревья с диаметром у основания до 30—40 см.

Датировка этих повреждений, согласно свидетельствам местных жителей, по ряду очевидных признаков, несомненно, указывала на осень 2002 г.

Комплексная совместная экспедиция иркутских и московских ученых (третья Витимская) работала в Мамско-Чуйском районе в июле—августе 2003 г. В ней приняли участие В.С. Антипин, С.В. Ефремов, М.А. Митичкин (ИГХ СО РАН), С.А. Язев, А.С. Летунов, А.С. Петров (ИСЗФ СО РАН), Д.Д. Бадюков, В.П. Крючков, А.М. Абдарахимов (Комитет по метеоритам РАН), а также А.Н. Арсентьев (Иркутский астрономический клуб). В экспедиционных работах в качестве проводников участвовали также местные охотники, в прошлом профессиональные геологи, В.Г. Андреев, А.П. Петрученко, А.И. Скибицкий и журналист А.Н. Моисеенко. Вдоль трассы полета метеорита в пределах зоны шириной 5—7 км и протяженностью около 50 км удалось обнаружить обширные участки (пятна и полосы размером в сотни метров—километры) сломанного и поваленного леса. В некоторых местах доля поврежденных деревьев составляла 10—15 %.

Рядом со сломанными деревьями (береза, лиственница, сосна, осина) наблюдались абсолютно не поврежденные такие же деревья. В некоторых случаях отломанные вершины находились на расстоянии 10—15 м от основного ствола. По свидетельствам местных жителей, ничего подобного ранее они в этих местах не наблюдали.

Кроме упомянутых выше экспедиций из Иркутска в июле—августе 2003 г. в Мамско-Чуйском и Бодайбинском районах Иркутской области работала экспедиция Уральского технического университета под руководством В.И. Гроховского. Она обследовала участок местности вдоль проекции полета метеорита, приходящийся на последние 20 км до расчетного места его падения. Другая группа исследователей из Научно-производственного объединения прикладной механики из Красноярска под руководством В.Е. Чеботарева и С.П. Котельникова опросила более 20 очевидцев на золотоносных приисках Бодайбинского района. Экспедицией были сделаны предварительные выводы о возможной неточности определения параметров траектории космического тела, зафиксированных спутником США. К сожалению, по результатам работ всех экспедиций кратеры, а также фрагменты метеорита не были найдены.

ПРИРОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ, СОПРОВОЖДАВШИЕ ПОЛЕТ И ПАДЕНИЕ МЕТЕОРИТА

Погодные условия. По данным метеостанций Бодайбо и Мамы, а также Иркутского областного Управления гидрометеослужбы погодные условия во время падения Витимского метеорита были крайне неблагоприятные для наблюдения. Нижняя кромка сплошной облачности вдоль трассы полета находилась на высоте 1100—1200 м, что соответствует отметкам господствующих здесь горных вершин. В пос. Мама температура днем была +12 °С, ночью +3 °С. Осадки в виде ливневого дождя отмечались в течение всего дня 24 сентября. В момент падения метеорита в Бодайбо и Маме температура была около 0 °С, в горах пробрасывало снег. В Бодайбо ветер был юго-западный со скоростью 2—5 м/с, однако в пос. Мама преобладал северо-западный ветер со скоростью 4—11 м/с. Сплошная облачность существенно ухудшала условия наблюдения, тем более что большинство потенциальных очевидцев этого события уже спали.

Световые и звуковые эффекты. Световые эффекты от летящего метеорита наблюдались на большой территории, включая г. Бодайбо, пос. Мама и населенные пункты, расположенные севернее. Большинство очевидцев сравнивали освещение с дневным, утверждая, что „...было больно смотреть“, и лишь некоторые из них в окрестностях Мамы видели летящий огненный шар с хвостом, от которого „...сыпались искры“ сквозь редкие просветы в облаках. В целом этот феномен выглядел как постепенное

появление равномерного белого яркого свечения на юго-западе, которое залило все небо и затем ушло на северо-восток. При этом очевидцами отмечалось изменение цвета свечения с белого на синий и красновато-бордовый. По показаниям многих, наблюдавших полет метеорита, он сопровождался глухим гулом „...как из-под земли“, который нарастал и завершился ударом и сотрясением земли, либо взрывом. Некоторые из очевидцев слышали два удара с интервалом в 1—2 с.

Электрофонные явления. Витимский метеорит вызвал множество акустических эффектов, причем есть указания на звуки, предшествовавшие свечению. Учитывая его большую удаленность, объяснить акустические эффекты можно только действием электромагнитного поля. Об этом свидетельствует также и то, что на несколько секунд засветились лампы накаливания. Произошло это, вероятно, как следствие возникновения сильного переменного электрического поля, хотя электроснабжение в пос. Мама в эту ночь отсутствовало. Все это позволяет относить Витимский метеорит к разряду электрофонных.

Сейсмическая регистрация падения метеорита. К сожалению, объективная регистрация сейсмических явлений, связанных с падением Витимского метеорита, отсутствует. По данным БОМСЭ ГС СО РАН, любезно предоставленных О.П. Поповой из Института динамики геосфер РАН (ИДГ РАН), на сейсмических станциях Чара, Неляты и Пеледуй на записях наблюдается слабый сигнал, который фиксирует локальное событие, приходящееся на это время. Сотрудники сейсмостанции Бодайбо определили два нечетких вступления, которые идентифицировали как колебания от далекого землетрясения или помехи, но записями эти наблюдения не подтверждены. Эта информация была сообщена также доктором геол.-мин. наук К.Г. Леви (ИЗК СО РАН).

Воздействие ударной волны. Летевший в атмосфере Земли метеорит оказал значительное воздействие на окружающую природу посредством ударной волны. Все три наши экспедиции обнаружили масштабные проявления участков сломанного и поваленного леса, расположенных вдоль трассы полета космического тела. По свидетельствам местных охотников, все эти нарушения лесных массивов датируются осенью 2002 г. Судя по тому, что в отдельных случаях наблюдались вывороченные деревья диаметром у основания до 30—40 см, воздействие ударной волны было весьма значительным. Местные жители в пос. Мусковит и Витимский, имеющие большой опыт прохождения горных выработок с применением буровзрывных работ, подтверждают, что удар, вероятно, связанный с ударной волной, был чрезвычайно мощным. От сильного удара происходили сотрясения построек, дрожание оконных стекол, падение предметов в домах и т. д. Эти явления, вызванные воздействием ударной волны, наблюдались в радиусе не менее 30—50 км от эпицентра.

ВЕЩЕСТВО ВИТИМСКОГО МЕТЕОРИТА

Краткая характеристика геологического строения и горных пород Мамско-Чуйского района Иркутской области. Проекция трассы Витимского метеорита приходится на территорию Мамско-Чуйского района, где преимущественно распространены метаморфические породы мамской серии и проявленные среди них уникальные мусковитовые месторождения, разрабатываемые в течение ряда десятилетий. Крупной геологической структурой в регионе является Мамский синклиниорий, который в северо-восточном направлении переходит в Бодайбинский синклиниорий. На современном эрозионном срезе образования мамской серии представлены карбонатно-терригенной толщей пород, которые первоначально были метаморфизованы в условиях амфиболитовой фации. При этом метаморфизм указанных пород соответствовал условиям силлиманит-биотит-альмандин-ортоклазовой и альмандин-кианит-биотит-мусковитовой субфаций [1]. Метаморфические породы Мамско-Чуйского региона испытали существенные деформации, перекристаллизацию и анатексис с формированием многочисленных тел пегматоидных гранитов и слюдоносных пегматитов [2], которые в течение длительного времени являлись источником промышленной добычи слюды (мусковита).

Результаты исследований вещественного состава частиц в пробах снега. Целью этих исследований была диагностика минеральных частиц на фильтрах, анализ их химического состава и поиск возможных частиц метеоритного вещества в отобранных пробах, полученных при фильтрации талой воды из снегового покрова. Наряду с обломками зерен минералов, встречающихся в горных породах данной местности, на отдельных фильтрах были обнаружены полые сферулы, размер которых обычно не превышал 100 мкм. Эти сферические образования черного и бурого цветов, очень хрупкие и представлены, как правило, обломками.

Мельчайшие частицы из проб снега были исследованы рентгеновским порошковым методом. Среди этих частиц наибольший интерес представляла сферула, анализ которой дал вполне рассчитываемую дифракционную картину. Полученные рентгеновские константы J (отн.) и d (Å) приведены в табл. 1 и сопоставлены с эталонами предполагаемых в черной сферуле фаз. Анализ межплоскостных расстояний (d) и интенсивностей линий на рентгенограмме дает достаточно уверенное основание считать, что в

Таблица 1.

Рентгенометрические константы черной сферулы из снегового покрова в районе разрушения Витимского метеорита

Черная сферула		Нефелин		Мелилит		β-кристобалит		Энстатит		Анортит	
<i>J</i>	<i>d</i> , Å	<i>J</i>	<i>d</i> , Å	<i>J</i>	<i>d</i> , Å	<i>J</i>	<i>d</i> , Å	<i>J</i>	<i>d</i> , Å	<i>J</i>	<i>d</i> , Å
—	—	3	4,32	2	4,23	—	—	—	—	—	—
7	4,16	8	4,16	—	—	10	4,15	—	—	3	4,04
5	3,84	10	3,83	—	—	—	—	—	—	—	—
2	3,71	—	—	6	3,71	—	—	—	—	7	3,76
4	3,30	7	3,27	—	—	—	—	—	—	7	3,21
4	3,18	—	—	—	—	—	—	7	3,17	10	3,18
—	—	—	—	—	—	—	—	5	3,15	3	3,13
—	—	2	3,04	6	3,07	—	—	—	—	—	—
10	2,99	10	3,00	—	—	—	—	—	—	—	—
10	2,85	3	2,88	10	2,85	—	—	10	2,87	3	2,83
5	2,56	5	2,57	—	—	—	—	—	—	—	—
9	2,52	1	2,50	2	2,53	—	—	—	—	—	—
2	2,44	—	—	7	2,44	—	—	—	—	—	—
2	2,39	—	—	7	2,40	—	—	—	—	—	—
6	2,33	4	2,34	—	—	—	—	—	—	—	—
4	2,29	3	2,30	7	2,29	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	2	2,20	2	2,17	—	—	—	—
4	2,08	2	2,08	2	2,11	5	2,07	—	—	—	—
2	2,03	—	—	6	2,04	—	—	—	—	—	—
1	1,98	1	1,98	3	1,97	1	1,99	—	—	—	—
1	1,82	1	1,92	6	1,93	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	5	1,87	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	3	1,85	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	6	1,82	—	—	—	—	—	—
3	1,76	—	—	10	1,76	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	5	1,73	—	—	—	—	—	—
3	1,64	—	—	5	1,63	7	1,64	—	—	—	—
3	1,61	1	1,61	3	1,61	—	—	—	—	—	—
4	1,56	1	1,56	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	1	1,55	—	—	—	—	—	—	—	—
3	1,51	—	—	7	1,51	—	—	—	—	—	—
3	1,48	1	1,48	3	1,48	—	—	—	—	—	—
2	1,46	1	1,47	2	1,45	6	1,46	—	—	—	—
4	1,42	1	1,43	7	1,43	—	—	—	—	—	—
5	1,38	1	1,38	7	1,38	4	1,38	—	—	—	—

Примечание. Все интенсивности приводятся по 10-балльной шкале. Слабые линии эталонов (JCPDS) не приведены. Полужирным выделены рентгенометрические константы, используемые для диагностики минеральных фаз в сферуле.

исследуемом образце присутствуют нефелин, мелилит, энстатит и высокотемпературный β-кристобалит, которому, вероятно, обязана своей повышенной интенсивностью линия 2,52 Å.

Вполне возможно, что эту минеральную ассоциацию могут дополнить следы энстатита и анортита, так как линия 3,18 Å, как самая интенсивная в их дифракционном спектре, никакой из перечисленных ранее фаз принадлежать не может.

Все эти минеральные фазы, включая и высокотемпературную разновидность кварца — кристобалит, встречаются в метеоритах, а именно в хондритах [3], но также широко распространены в земных горных породах. При этом оливин как один из наиболее распространенных породообразующих минералов хондритов в данной минеральной ассоциации не был найден. В то же время по Г. Прайору и Б. Мэйсону [4]

в классе энстатитовых хондритов главными минералами являются энстатит и никелистое железо, а оливин может отсутствовать или быть в качестве второстепенной фазы.

Количественный и качественный анализы составов обнаруженных частиц из снегового покрова выполнялись в ИГХ СО РАН на электронно-зондовом микроанализаторе „Superprobe-733“ (JEOL Ltd, Япония) при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе зонда 20 нА (диаметр зонда ~1 мкм) и в Геологическом институте СО РАН на электронном микроскопе „LEO 1430VP“ (LEO Ltd) с помощью энергодисперсионного анализатора „Inca Energy 300“ (Oxford Instruments Ltd.) при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе ~0,5 нА (размер зонда <1 мкм, время набора спектра 50 с). Твердые частицы вещества из снегового покрова были помещены в оксидные шашки и приполированы. При подготовке препаратов к анализу проводилось углеродное напыление.

В результате на микроанализаторе определен состав частиц в 234 точках наблюдения и на микроскопе в 70 точках наблюдения. В итоге микроаналитических исследований из твердых осадков снеговых проб удалось выделить три группы минералов и минеральных соединений:

1) минералы, содержащиеся в земных метаморфических и магматических породах региона, которые в виде частиц из коры выветривания, либо в результате эолового переноса терригенного материала попадали в снеговой покров;

2) минералы и минеральные соединения, которые могут быть идентифицированы как метеоритное вещество;

3) углеродсодержащее „сажистое“ вещество, происхождение которого не может быть достоверно идентифицировано, в частности, из-за применения углеродного напыления шашек.

Отдельные минеральные соединения могут быть отнесены как к группе условно „метеоритного“ происхождения, так и к группе „земных“ образований.

Минералы осадочно-терригенного происхождения. Среди минералов, присутствие которых в снеговом покрове исследуемого района связывается с эоловым переносом терригенного материала с поверхности земли, установлены кварц (Qtz), плагиоклазы (Pl), калиево-натриевые полевые шпаты (Kfs), клинопироксен (Cpx), амфибол (Amph), мусковит (Mus), гидрослюда, гематит и альмандин-гроссуляровые гранаты (табл. 2).

Кварц и полевые шпаты являются широко распространенными минералами в кристаллических породах и аллювиально-пролювиальных отложениях района. Как известно, плагиоклазы из метеоритов обычно отвечают по составам анортитам, битовнитам, реже лабрадорам и андезинам [6]. Более редкими являются олигоклазы, альбиты и калиево-натриевые полевые шпаты. Среди частиц минералов из снегового покрова обнаружены полевые шпаты четырех групп составов (см. табл. 2), из которых альбиты ($Ab_{95,5}$) и K-Na разновидности полевых шпатов ($Ab_{17,3}Or_{82,7}$) представлены единичными анализами. Две другие, наиболее представительные, группы полевых шпатов отвечают по составам олигоклазам — кислым андезинам ($An_{16,6-35,7}Or_{0,4-2,3}$) и калиевым полевым шпатам ($Or_{92,9-95,6}$). Следует отметить, что среди плагиоклазов достаточно отчетливо выделяются составы с повышенными содержаниями суммарного FeO (до 1,49 мас.%). Это олигоклазы и альбиты из микрочастиц сложного полиминерального строения, в составе которых присутствуют Ba-содержащие (Ba до 15 мас. %) и другие, неидентифицированные силикатные минеральные фазы (см. далее). Относительно крупные частицы полевых шпатов из снегового покрова не содержат в своем составе Fe и принадлежат, вероятно, метаморфическим породам данной территории. Как известно, присутствие в составах полевых шпатов оксидов Fe (>1 мас.%) характерно, в частности, для вулканических пород и метеоритов. Однако, помимо FeO, в полевых шпатах из метеоритов обычным является присутствие примесей MgO. В исследуемых полевых шпатах такие примеси отсутствуют.

Клинопироксены из изученных проб снегового покрова по составам отвечают диопсидам ($Wo_{50}Fs_{9,5}$) и салитам ($Wo_{46,9-49,7}Fs_{10,1-12,4}$) (см. табл. 2), а в образцах метеоритов преимущественным распространением пользуются Ca и Fe-Mg пироксены с высокими содержаниями ферросилитового компонента, т. е. они обогащены Fe. Несмотря на то, что в метеоритах также отмечены диопсиды и салиты [8, 9], следует отметить, что обнаруженные в снеговом покрове Cpx не отличаются высокой железистостью, а их составы характеризуются низкими содержаниями TiO_2 , что свойственно пироксенам из пород метаморфических толщ территории.

Обнаруженные в снеговом покрове частицы амфиболов принадлежат измененным роговым обманкам (см. табл. 2). В метеоритах в виде включений в пироксенах обнаружены высокотитанистые амфиболы — керсутиты [7], а также щелочные амфиболы — арфведсониты [10]. Но для этих стекол характерно присутствие Cr_2O_3 . С другой стороны, в анализах амфиболов из снегового покрова отмечаются достаточно высокие содержания калия, что не свойственно метеоритному веществу. Полученные характеристики составов амфиболов не противоречат их происхождению из метаморфических толщ региона.

Таблица 2. Частичные микрозондовые анализы минералов из снегового покрова в районе разрушения Витимского метеорита (мас.%)

Компонент	Клинопироксены			Гранаты		Гидрослюды			Амфиболы			Полевые шпаты				
	61M3	64M3	65M3	151M4	152M4	106M4	107M4	10M1	136M4	180M4	143M4	79M4	111M4	BSE-2-9	BSE-1-9	
SiO ₂	49,02	47,57	49,99	38,77	39,50	43,28	43,41	48,30	39,28	41,44	63,02	62,66	62,59	55,15	63,63	
Al ₂ O ₃	3,65	4,24	2,78	23,67	23,43	29,50	29,62	25,99	9,12	8,29	23,00	17,18	17,28	20,65	18,90	
FeO*	5,34	6,94	5,81	15,00	10,95	2,11	2,23	1,21	13,97	15,36	H.o.	H.o.	H.o.	1,49	0,31	
MgO	12,74	12,85	12,96	0,90	0,82	1,09	1,14	3,67	9,67	10,06	H.o.	H.o.	H.o.	H.o.	H.o.	
CaO	21,89	20,57	22,30	17,84	17,95	H.o.	H.o.	H.o.	10,75	10,70	4,27	H.o.	H.o.	3,90	0,86	
Na ₂ O	0,68	0,73	0,54	0,11	0,08	0,41	0,43	0,10	1,52	1,27	10,07	0,49	1,93	8,03	9,99	
K ₂ O	H.o.	0,09	H.o.	0,07	0,07	10,46	10,63	8,70	1,25	1,08	0,44	15,76	14,04	1,30	H.o.	
Wо (Alm)	49,99	48,37	49,70	(37,77)	(30,65)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
En (Prp)	40,49	41,43	40,19	(4,04)	(4,09)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Fs (Grs)	9,52	10,20	10,11	(57,55)	(64,38)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
An	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18,55	0,00	0,00	19,52	4,54	
Ab	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	79,17	4,51	17,28	72,73	95,43	
Or	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,28	95,49	82,72	7,75	0,00	

Примечание. Здесь и далее: FeO* — все Fe в виде FeO; H.o. — не обнаружено; прочерк — не определено; расчеты минералов проводились с использованием программного пакета „Crystal“ [5]. Минералы: пироксены — Wo (воластонит), En (энстатит), Fs (ферросилит), Grt (гранат), Alm (альмандин), Prp (пироп), Grs (гроссуляр), полевые шпаты — An (анортит), Ab (альбит), Or (ортоклаз). Анализы 61M3—111M4 выполнены на микроанализаторе Jeol Superprobe-733 (JEOL Ltd, Япония), оператор Л.А. Павлова (Институт геохимии СО РАН, г. Иркутск). Анализы BSE-2-9, BSE-1-9 (рис. 5) и далее все анализы в табл. 3—8 выполнены на микроанализаторе „Inca Energy 300“ с использованием электронного микроскопа „LEO 1430VP“, оператор Н.С. Карманов (Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ).

Гидрослюды и мусковиты, так же как кварц и полевые шпаты, пользуются среди минеральных частиц снегового покрова исключительно широким распространением. Поскольку определить принадлежность глинистых минеральных частиц к конкретным типам минералов по данным электронно-зондового микроанализа затруднительно, все они рассматриваются как гидрослюды, среди которых вероятно присутствие как мусковитов, так и иллита, апофиллита и серицита (см. табл. 2). Химические составы обнаруженных минералов из группы гидрослюд не отличаются сколько-нибудь примечательными особенностями в сравнении с соответствующими минералами из метаморфических толщ и коры выветривания района.

Минералы метеоритного (?) происхождения. К минералам условно „метеоритной“ группы отнесены сульфиды, металлические соединения и сферулы. Среди тех минералов, которые могут быть идентифицированы по данным электронно-зондового микроанализа, присутствуют соединения, свойственные как метеоритному веществу, так и земным горным породам.

Пирит, Fe и Fe-Ni металлические соединения. При проведении исследований на электронном микроскопе получены данные, свидетельствующие о наличии среди микрочастиц из снегового покрова как сульфидных, так и металлических фаз. Обнаружено одно зерно с составом пирита и несколько частиц железистых соединений — окисленное и металлическое железо, никелистое железо.

Частица Ni-содержащего пирита размером 3—4 мкм (рис. 2, 3) обнаружена в ассоциации с частицей металлического Mn-содержащего железа среди углеродистого (сажистого) материала (табл. 3). Суммы концентраций элементов в пирите при расчете на бескислородные соединения дают пониженные значения, что может быть связано с окисленностью минерала. Пирит и металлическое железо в ассоциации с другими Fe-содержащими оксидными минеральными фазами достаточно часто встречаются в метеоритном веществе, но также широко распространены и в земных породах различного генезиса: железорудные проявления, гидротермальные системы, магматические поро-

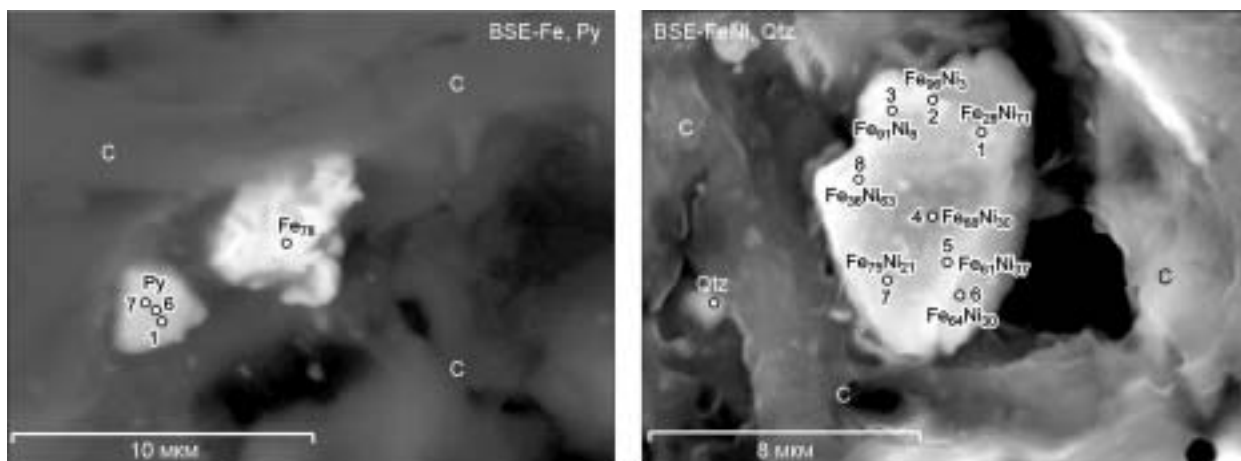


Рис. 2. Изображение частиц пирита (Py), металлического (Fe), никелистого железа (FeNi) и кремнезема (кварца?) (Qtz) в углеродистой (сажистой) матрице (C) в обратнорассеянных электронах (BSE).

BSE-Fe, Py — ассоциация частиц пирита и металлического железа; BSE-FeNi, Qtz — ассоциация кварца и никелистого железа. Цифрами обозначены процентные содержания металлов (см. табл. 3, 4).

ды. Присутствие в составе железистых фаз Mn на наблюдаемом уровне содержаний в отдельных случаях свойственно и метеоритному веществу. Однако в данном случае не исключено техногенное заражение пробы при ее подготовке к анализу.

Частица никелистого железа в ассоциации с микрочастицей кремнезема обнаружена в углеродистом (сажистом) материале. Размер частицы 6×8 мкм. Частица неоднородна и состоит из микроучастков металлического железа с примесью Ni и никелистого железа (см. рис. 2, 4; табл. 4). Низкие суммарные содержания компонентов в пересчете на металлы, а именно Ni и Fe, возможно, связаны с аналитической ошибкой, обусловленной неполным выведением частицы к поверхности препарата. Соотношения Ni и Fe соответствуют характерным для метеоритного вещества Fe-Ni минералам — тэнниту и камаситу.

Таблица 3. Частичные анализы Ni-содержащего пирита и Mn-содержащего железа из снегового покрова в районе разрушения Витимского метеорита (мас.%)

Компонент	1	6	7	Fe ₇₈
Fe	32,54	27,40	31,52	77,85
Mn	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0,40
Ni	1,27	1,14	1,21	Н.о.
S	45,01	33,72	50,90	»
<i>Расчет на 100 % без учета примесей Ca</i>				
Fe	41,21	43,83	37,49	99,49
Mn	—	—	—	0,51
Ni	1,61	1,82	1,44	—
S	57,00	53,94	60,54	—
Сумма	99,82	99,59	99,47	100,00

Примечание. Анализы № 1, 6, 7 — Ni-содержащий пирит; Fe₇₈ — Mn-содержащее железо.

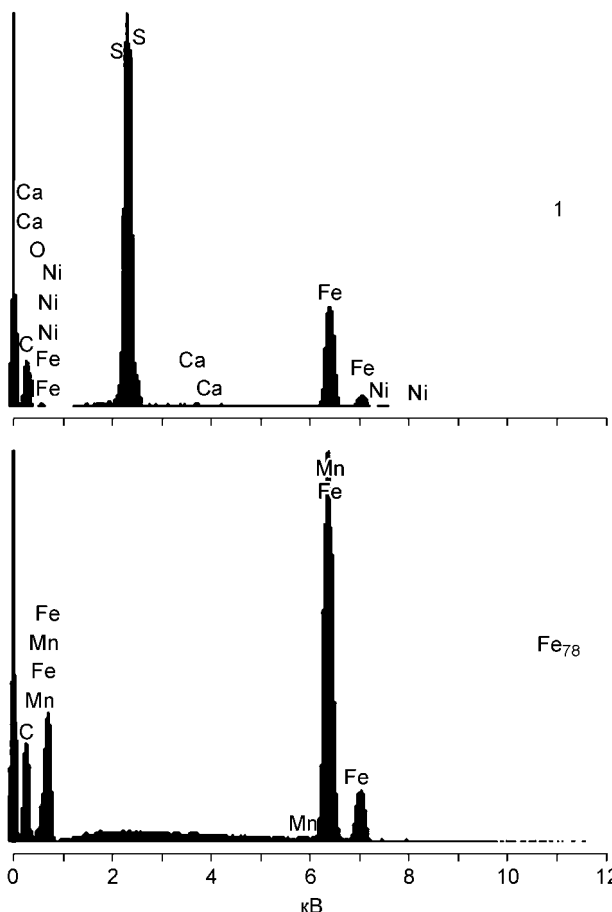


Рис. 3. Электронные энергетические спектры частиц Ni-содержащего пирита и Mn-содержащего железа из снегового покрова в районе разрушения Витимского метеорита.

Здесь и на рис. 4 спектры приведены по данным исследований на микроанализаторе „Inca Energy 300“ (Oxford Instruments Ltd.). Номера спектров 1, Fe₇₈ соответствуют номерам анализов в табл. 3.

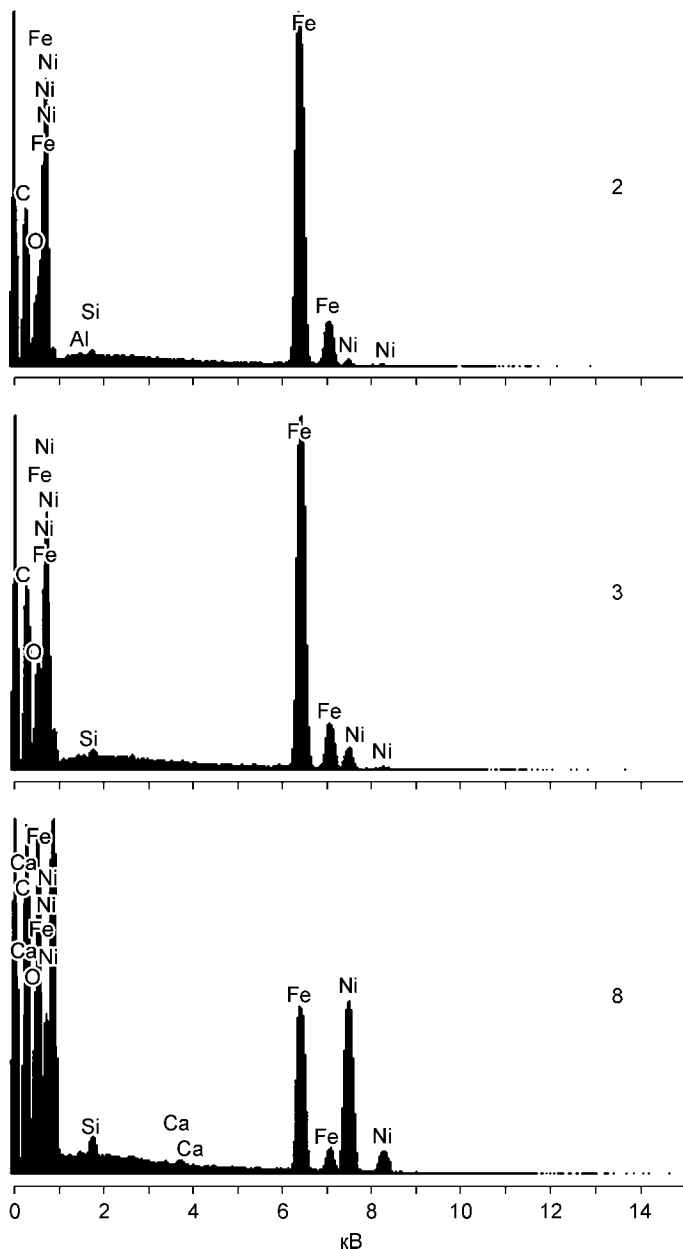


Рис. 4. Электронные энергетические спектры частицы никелистого железа из снегового покрова в районе разрушения Витимского метеорита.

Номера спектров (2, 3, 8) соответствуют номерам анализов в табл. 4.

На рис. 3, 4 приведены электронные энергетические спектры для отдельных точек анализов пирита, Mn- и Ni-содержащего железа. Спектры демонстрируют низкую интенсивность линий кислорода, что свидетельствует в пользу металлической и сульфидной форм нахождения соответствующих соединений.

Сферула с пористой структурой. Сферула размером $\sim 85 \times 85$ мкм обладает округлой формой и пористой структурой (рис. 5). По аналогии со сходными сферулами, которые были обнаружены исследователями при поисках метеоритного вещества в других регионах [11, 12], предполагается, что эта частица была насыщена летучими компонентами. По изображению сферулы в обратнорассеянных электронах (см. рис. 5) видно, что доля поровых образований в частице достигает 60—65 % от площади среза.

Составы матрицы исследованной частицы близки иллиту [13], а вероятнее всего, представляют собой твердофазовую смесь иллита и монтмориллонита (табл. 5). Иллиты и монтмориллониты достаточно часто встречаются в метеоритном веществе и импактных новообразованиях или могут являться продуктами их выветривания [14]. Среди Fe-Ti минералов из сферулы с пористой структурой установлен состав наиболее крупной (4×7 мкм) частицы, имеющей призматическую форму выделения (см. рис. 5, табл. 6). Составы этого минерального соединения близки ильменитам. В сравнении с составами

таких Fe-Ti минералов, как армолокит и псевдобрукит $[(Fe, Mg, Ti)_3O_5]$, которые достаточно редки и встречаются как в метеоритном веществе [15], так и в лунных породах [16], а также были установлены в качестве аксессуарных минералов в породах щелочных магматических комплексов Восточной Сибири, Северной Америки, Испании и других регионов, исследованные минералы отличаются, помимо примесей

Таблица 4. Частичные анализы никелистого железа из снегового покрова в районе разрушения Витимского метеорита (мас.%)

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8
Fe	18,10	74,71	69,52	35,89	30,79	25,83	42,16	20,56
Ni	45,07	1,97	6,40	15,90	17,91	12,14	12,06	36,18
<i>Расчет на 100 % без учета примесей Si, Al, Na</i>								
Fe	28,34	96,49	90,99	67,90	61,29	63,76	75,00	35,65
Ni	70,58	2,54	8,38	30,08	35,65	29,97	21,46	62,74
Сумма	98,92	99,03	99,37	97,98	96,93	93,73	96,46	98,39

Примечание. 1—8 — номера образцов (см. рис. 2).

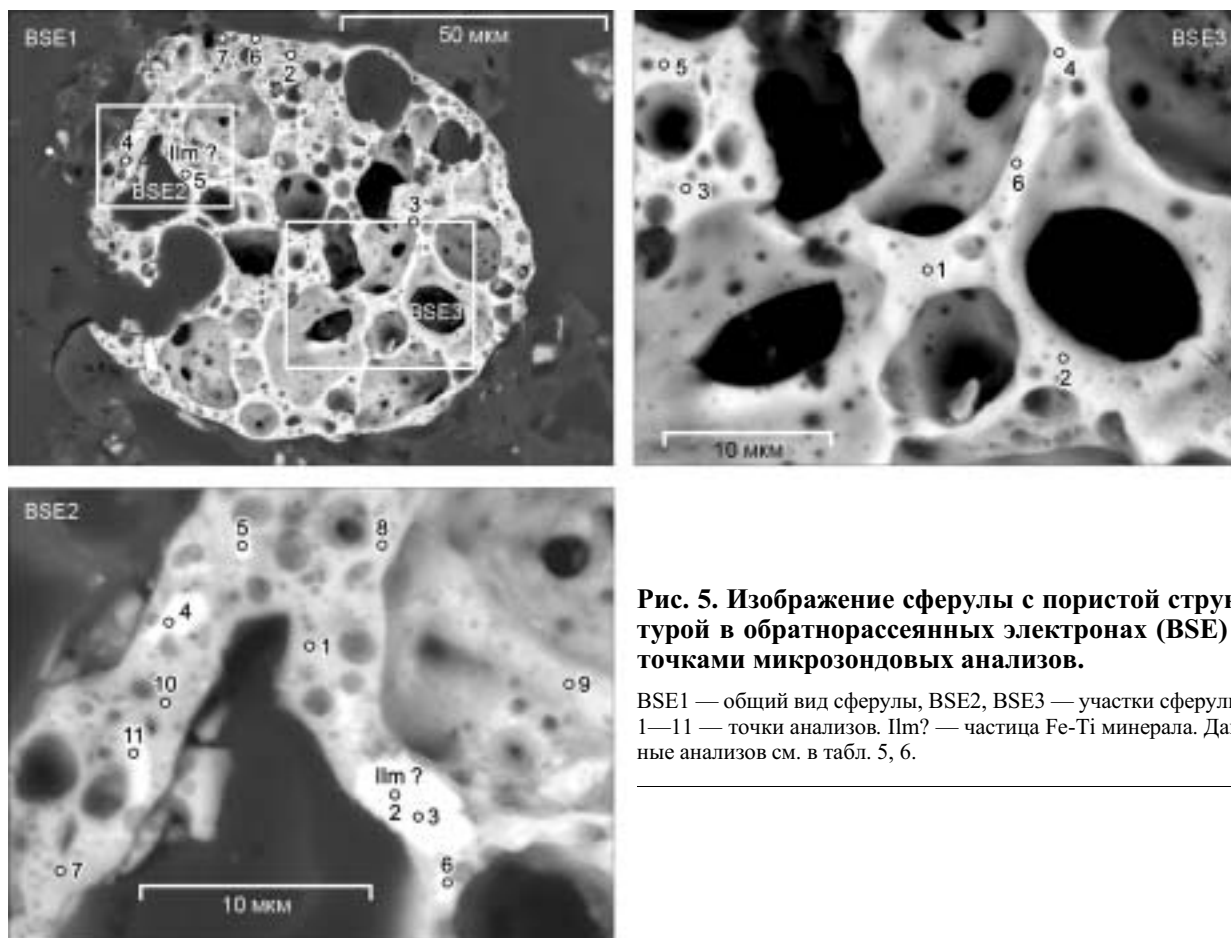


Рис. 5. Изображение сферулы с пористой структурой в обратнорассеянных электронах (BSE) с точками микрозондовых анализов.

BSE1 — общий вид сферулы, BSE2, BSE3 — участки сферулы. 1—11 — точки анализов. Ilm? — частица Fe-Ti минерала. Данные анализов см. в табл. 5, 6.

Si и Al, высокими концентрациями Mn. Это не свойственно космогенному веществу. Однако в последнее время в группу армоколита—псевдобрукита комиссией IMA включен новый минерал с формулой $(\text{Ti, Fe, Mg, Mn})_{1-x}\text{Ti}_2\text{O}_5$, название которого пока условное — IMA2000-016. Таким образом, существует вероятность обнаружения в исследуемой сферуле минеральной разновидности из указанной группы — минерала с высокими концентрациями MnO.

Полиминеральная сферула с пористой структурой. Среди исследованных минеральных частиц из снегового покрова выделяется сферула, имеющая сложный полиминеральный состав. Исследованный обломок этой сферулы размером $>100 \times 100$ мкм также имеет пористую структуру с пустотами округлой и эллипсовидной формы, площадь которых на поверхности среза частицы составляет 30—35 % (рис. 6). Матрица обломка полиминеральной сферулы представляет собой достаточно однородное минеральное соединение, насыщенное мельчайшими кристаллическими выделениями Fe-Ti минералов размером

Таблица 5. Частичные анализы силикатной матрицы из сферулы с пористой структурой (мас.%)

Компонент	BSE1		BSE2			BSE3				Иллит [13]
	6	1	8	9	1	2	3	5		
	4	5	2	3	9	10	11	12	14	
SiO ₂	32,60	39,80	45,45	45,54	35,96	35,07	37,15	34,37	40,87	
TiO ₂	1,41	1,43	1,08	1,71	2,06	2,20	2,36	2,34	2,13	
Al ₂ O ₃	26,90	24,52	29,58	29,19	20,12	20,80	22,62	21,41	20,45	
FeO*	28,36	15,97	9,56	18,25	14,46	15,45	17,53	18,70	11,53	
MgO	1,85	3,50	2,33	4,14	10,01	9,70	9,57	9,22	6,86	
CaO	0,54	0,76	0,76	0,86	0,69	0,82	0,93	0,95	0,89	
Na ₂ O	0,55	0,66	0,70	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	
K ₂ O	2,70	2,56	2,83	1,75	3,16	2,07	2,95	2,61	3,25	

Таблица 6.

Частичные анализы Fe-Ti минералов из сферулы с пористой структурой (мас.%)

Компонент	BSE1	BSE2		Arm	Pbr
	5	2	3		
SiO ₂	3,82	3,67	2,93	0,00	0,00
TiO ₂	44,33	46,31	45,42	76,83	25,13
Al ₂ O ₃	3,03	3,10	2,18	0,00	0,00
FeO*	20,18	21,12	64,13	8,63	64,46
MnO	11,96	11,85	11,63	0,00	0,00
MgO	0,71	0,67	0,00	14,54	1,69

Примечание. Составы армолколита (Arm) и псевдобрукита (Pbr) приведены по [http://webmineral.com].

1 × 2—3 × 5 мкм и сростками игольчатых кристаллитов Ва-содержащих силикатных минералов (1 × 10—15 мкм). Анализ этих кристаллитов с захватом области матрицы показал концентрации Ва до 15 мас.%. В краевых зонах наблюдаемого обломка сферулы с контактами реакционного характера присутствуют кристаллы полевых шпатов (10 × 20 мкм) — кислого андезина и альбита, отличающихся заметными содержаниями Fe (см. табл. 2).

При микроаналитических исследованиях матрицы сферулы было установлено, что главными веществами ее особенностями являются силикатный состав с высокими содержаниями Ti, Na, P и Ba (табл. 7). Уровни концентраций этих компонентов в матрице близки амфиболовым составам и соответствуют смеси таких минеральных разновидностей амфиболов, как керсутит (Ti) и Na-Ca амфиболы (возможно, тарамит и его Al, Fe, Mg разновидности). Хотя это минеральное вещество и может соответствовать по составу щелочным натровым амфиболам с высокой титанистостью, однако отсутствуют рентгеноструктурные данные. Поэтому не исключается и принадлежность вещества к группе аморфных соединений специфического состава (стекла?). Пористая структура сферулы и реакционный характер взаимоотношений между матрицей частицы и зернами полевых шпатов свидетельствуют о протекании процессов вторичного преобразования вещества и возможной дегазации частицы.

Как было отмечено выше, щелочные амфиболы — арфведсониты [10] и титанистые амфиболы — керсутиты [6] ранее были обнаружены в метеоритном веществе и в реголитовых брекчиях. В некоторых случаях в метеоритах обнаружены и Ва-содержащие стекла [17, 18]. В таких образцах метеоритного вещества, которые исследователи связывают с обломками щелочных пород, амфиболы ассоциируют с полевыми шпатами. Титанистые амфиболы из метеоритов наблюдаются, как правило, в виде включений в пироксенах и оливинах [6, 10].

Fe-Ti кристаллические выделения распространены в матрице сферулы неравномерно (см. рис. 6). На стенках округлых пор обломка частицы отчетливо видно, что эти кристаллические выделения распространены по всему объему матрицы сферулы, а не являются поверхностным слоем, что важно для исключения предположения о загрязнении материала при его подготовке к анализу. Состав Fe-Ti минеральных соединений близок составу шпинелей (табл. 8), а их особенностью являются высокие концент-

рации примесных компонентов, таких как Si, Al, Na, K. Отсутствие в их составах Cr₂O₃ и высокие содержания примесных компонентов затрудняют отнесение этих минеральных соединений к группе образований магматогенного или метеоритного происхождения, однако не исключают их абляционную природу.

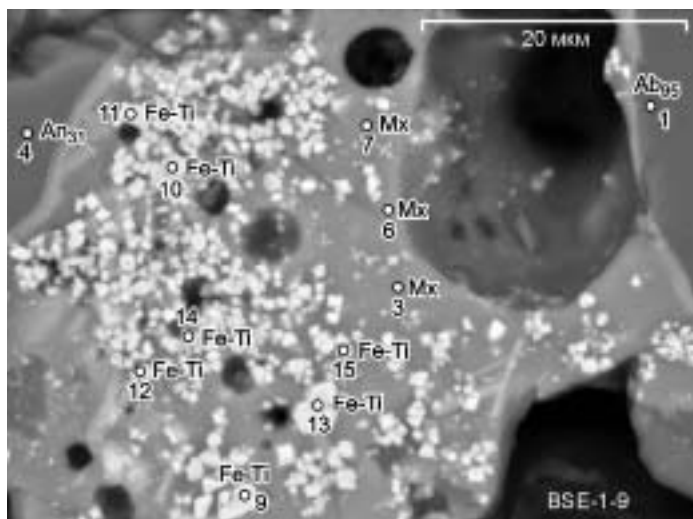


Рис. 6. Изображение полиминеральной сферулы с пористой структурой в обратнорассеянных электронах (BSE-1-9) с точками микрозондовых анализов.

Mx — точки анализов однородной матрицы с амфиболовым (?) составом (ан. 3, 6, 7, см. табл. 7), Fe-Ti — точки анализов Fe-Ti минералов (ан. 9—15 см. в табл. 8).

Таблица 7. Частичные анализы силикатной матрицы из полиминеральной сферулы с пористой структурой (мас.%)

Номер анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	BaO
3	38,86	4,03	12,26	14,42	1,47	8,22	5,60	1,70	1,44	1,09
6	36,83	5,18	10,56	18,12	1,59	8,03	5,28	1,80	2,45	0,68
7	39,82	3,91	11,04	15,26	1,42	8,20	5,21	1,65	1,68	0,93

Таблица 8. Составы Fe-Ti кристаллических выделений в полиминеральной сферуле с пористой структурой (мас.%)

Номер анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
9	4,39	18,76	2,91	61,29	0,37	2,21	0,63	0,80	0,29
10	7,01	18,49	4,79	56,51	0,00	1,87	0,87	0,87	0,45
11	9,05	16,75	4,56	57,63	0,35	2,17	0,76	1,19	0,35
12	14,34	6,17	14,56	48,02	0,00	1,83	1,71	1,94	0,72
13	3,46	20,31	2,41	59,94	0,37	1,90	0,64	0,67	0,28
14	13,41	6,73	12,71	56,57	0,00	2,20	1,51	2,19	0,52
15	11,22	5,36	10,50	58,77	0,48	2,00	2,12	2,19	0,45

Углеродсодержащее „сажистое“ вещество. Общее содержание обычных оксидных компонентов в сажистом веществе, в котором обнаружены, в частности, пирит и никелистое железо, составляет не более 2—5 мас.%. Анализ на углерод не производился в связи с тем, что приготовленные препараты для микроаналитических исследований были подвергнуты углеродному напылению. Частицы сажистого вещества могут соответствовать органической саже, которая могла быть привнесена в снеговой покров с мест лесных пожаров или в результате деятельности человека.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведенная диагностика частиц, обнаруженных на фильтрах, а также исследования их минерального и химического составов показали, что они содержат минеральные ассоциации, которые встречаются в метеоритном веществе. Наибольший интерес представляют сферулы и частицы Ni-содержащего пирита, а также никелистого железа, в котором соотношение Fe и Ni соответствует типичным метеоритным минералам — камаситу и тэниту.

В работе Г. Курата и др. [19], в которой исследуются минералогия и геохимия микрометеоритов, в том числе и сферул, собранных из антарктических льдов, показаны признаки их вещественного сходства и отличия от типичных хондритовых метеоритов. Микрометеориты, по данным этих авторов, могут характеризовать самостоятельный тип космического вещества, а в случае с веществом, имеющим отношение к абляционному следу Витимского метеорита, мы должны были ожидать вещественные признаки сходства сферул с собственно метеоритами. Однако обнаруженные сферулы из снегового покрова в районе трассы полета Витимского метеорита не имеют прямых признаков сходства с хондритовыми метеоритами, за исключением рентгеноструктурных данных о присутствии в сферулах энстатита. Если предполагать, что сферулы в какой-то степени все же характеризуют вещество абляционного следа, то возможным объяснением таких различий следует считать процессы вторичного преобразования метеоритного материала при его горении в верхних слоях атмосферы. В этом случае тугоплавкую силикатную составляющую метеорита можно обнаружить, скорее, в районе падения его фрагментов, а среди вещества абляционного следа вполне вероятно обнаружение таких новообразованных соединений, как филло-силикаты, оксиды и гидроксиды металлов.

Сферулы с пористой структурой из снегового покрова района разрушения Витимского метеорита обладают морфологическим сходством с микрометеоритами из снегового покрова Антарктиды (рис. 7) [19], которые также были подвергнуты процессам вторичного преобразования. Важно и то, что „витимские“ сферулы были встречены только в снеговых пробах, отобранных вблизи проекции трассы полета метеорита. Все это не противоречит выводу о том, что они могли выпасть из пылевого абляционного следа болида. Этот вывод подтверждается и при рассмотрении минеральной ассоциации в составе сферул, которая не типична для коренных пород Мамско-Чуйского района. Обнаружение сферул в отобранных пробах и их вещественные признаки, с нашей точки зрения, больше свидетельствуют в пользу внеземного происхождения исследованных частиц, обнаруженных на фильтрах снеговых проб.

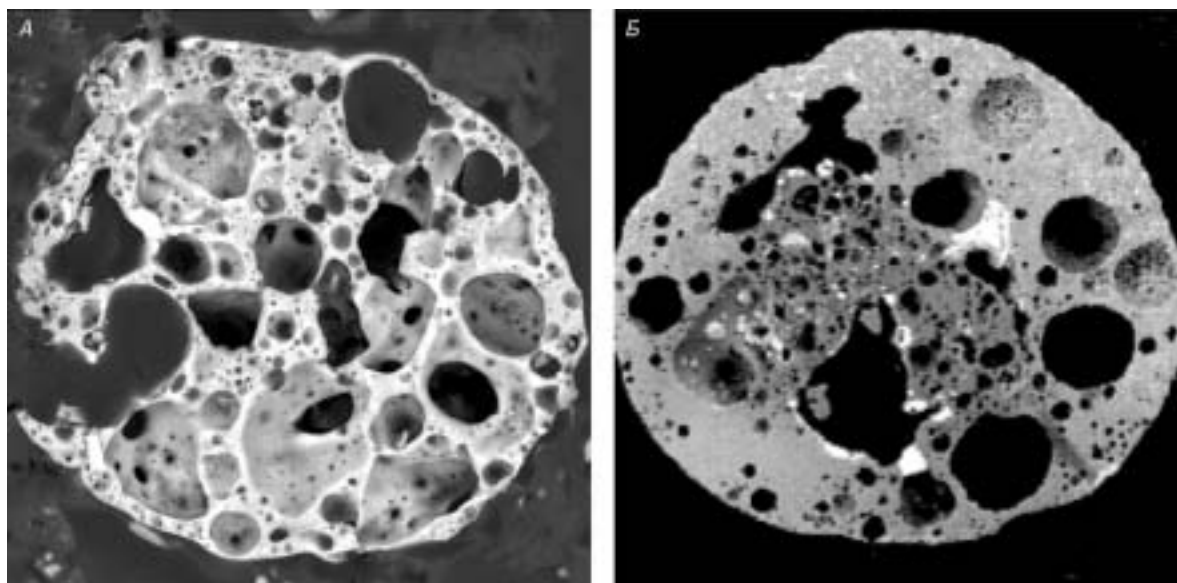


Рис. 7. Изображения сферулы с пористой структурой из снегового покрова района разрушения Витимского метеорита (А) и подобной сферулы (микрометеорита) из снегового покрова Антарктиды (Б) [11] в обратнорассеянных электронах.

Масштаб рис. 7, А показан на рис. 5.

При изучении обнаруженных частиц с использованием электронного микроскопа и энергодисперсионного анализатора установлено присутствие в них самородного железа, содержащего первые проценты никеля, а также никелистого железа с содержанием никеля уже десятки процентов. Этот элемент обычно концентрируется в метеоритах в минералах камасите и тэнните. В табл. 9 приведены концентрации железа и никеля в исследованных нами частицах и в металлических частицах некоторых метеоритов, которые содержат различные полиморфные модификации FeNi.

Как можно наблюдать, содержания обоих элементов варьируют в широких пределах и вполне укладываются в уровни их концентраций в различных метеоритах, как следует из данных по железным и каменным (хондриты) метеоритам из различных регионов мира (см. табл. 9).

Сумма результатов исследований минеральных частиц из снегового покрова не противоречит предположению о метеоритном происхождении отдельных сферул и микрочастиц. Однако на основании полученных данных нет возможности классифицировать тип Витимского метеорита.

Не менее важной является проблема механического воздействия ударной волны, которая вызывает много вопросов. С одной стороны, амплитуда волны, пришедшей с высоты 30—20 км, не должна быть существенной. Поэтому выглядит на первый взгляд нереальной связь между волной и множеством поваленных и поврежденных деревьев. С другой стороны, очевидцы указывают на значительное действие

Таблица 9. Состав никелистого железа (мас.%) в образцах некоторых метеоритов [18] и частицах из снегового покрова в районе разрушения Витимского метеорита

Метеорит	Камасит		Тэннит	
	Fe	Ni	Fe	Ni
Каали	91,6—92,7	6,1—6,5	64,6—71,4	27,5—35,5
Чинге	95,1	4,9	79,3	20,0
Пилиствере	92,2—93,0	6,9—7,8	80,1—89,2	9,6—19,5
Бахмут	91,7—93,3	5,9—6,0	64,2—72,3	27,6—35,9
Крымка	92,5—94,9	3,9—6,0	48,8—58,4	40,3—49,4
Жигаловка	9,20—92,5	5,5—6,5	47,7—71,1	28,4—51,1
Александровский хутор	92,2—92,6	7,4—7,5	46,1—67,6	31,7—52,5
Витимский метеорит*	91,0—96,5	2,5—8,4	28,3—75,0	21,5—70,6

* Приведены интервалы содержания металлов по анализам, рассчитанным на 100 % (см. табл. 4).

ударной волны даже вблизи пос. Мама, в 50 км от начального участка трассы падения. Большая мощность ударной волны, несмотря на значительное удаление ее источника, может быть, с нашей точки зрения, объяснена высокой скоростью полета болида. К сожалению, в этом случае остается мало шансов найти крупные фрагменты космического тела: при высокой скорости интенсивная абляция должна была привести к разрушению и распылению метеорита на больших высотах. Тогда частицы, найденные в снеговом покрове второй Витимской экспедицией, могут оказаться единственными материальными образцами вещества Витимского метеорита. Тем не менее результаты выполненных исследований показали, что необходимо продолжить поиски фрагментов Витимского метеорита с целью надежного установления его вещественного состава и выяснения природы космического тела, влетевшего в атмосферу Земли 25 сентября 2002 г. Если скорость его полета была достаточно высокой, он мог упасть несколько дальше точки рассчитанной на сегодня траектории.

Сложность и неоднозначность реконструкции уникального природного события, связанного с полетом Витимского метеорита, в очередной раз указывает на важность комплексной проблемы астероидной опасности, эффективного мониторинга ближнего околоземного пространства в целях раннего обнаружения метеоритов метровых и дециметровых размеров, движущихся с большими скоростями. Это требует разработки технологий метеоритных исследований для решения как фундаментальных научных задач, так и прикладных задач прогноза катастрофических природных явлений.

Авторы выражают благодарность О.П. Поповой из Института динамики геосфер РАН и Д.Ю. Ханукаевой из Московского физико-технического института (государственного университета), а также М.А. Назарову из Комитета по метеоритам РАН за полезные консультации и постоянный конструктивный интерес к исследованиям Витимского болида. Экспедиционные и лабораторные исследования проводились при финансовой поддержке Сибирского отделения РАН. Кроме того, авторы считают своим долгом выразить особую благодарность руководителям Мамско-Чуйского района Иркутской области А.А. Богуну, В.И. Яйкову и безвременно ушедшему из жизни Н.С. Чекашкину, главе администрации пос. Витимский А.Б. Сергию, проводникам экспедиций и надежным товарищам В.Г. Андрееву, А.П. Петрученко, А.И. Скибицкому за содействие и неоценимую помощь при проведении полевых экспедиционных работ на севере Иркутской области.

Авторы благодарны академику Н.В. Соболеву за критический анализ материалов статьи и важные рекомендации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Неелов А.Н.** Структурно-метаморфическая эволюция пород Мамской кристаллической полосы в связи с их мусковитоносностью // Мусковитовые пегматиты СССР. Л., Наука, 1975, с. 168—174.
2. **Макагон В.М.** Пегматоидные граниты зон регионального метаморфизма высоких давлений. Новосибирск, Наука, 1977, 208 с.
3. **Додд Р.Т.** Метеориты. Петрология и геохимия. М., Мир, 1986, 384 с.
4. **Мэйсон Б.** Метеориты. М., Мир, 1965, 306 с.
5. **Перетяжко И.С.** CRYSTAL — прикладное программное обеспечение для минералогов, петрологов, геохимиков // Зап. ВМО, 1996, № 3, с. 140—148.
6. **Zeigler R.A., Korotev R.L., Jolliff B.L.** Petrography of lunar meteorite PCA 02007, a new feldspathic regolith breccia (abstract) // Lunar and Planetary Science XXXV, 2004, CD-ROM, Abstract № 1978.
7. **Treiman A.** Amphibole in martian meteorite EET 79001 // 60th Annual Meteoritical Society Meeting. Hawaii, USA. 1997. www.lpi.usra.edu/meetings/metsoc97/pdf/5134.pdf.
8. **Arai T., Ishi T., Otsuki M.** Mineralogical study of a new lunar meteorite Yamato 981031 // Lunar and Planetary Science XXXII, 2002. CD-ROM, Abstract № 2064.
9. **Semenova A.S., Nazarov M.A., Kononkova N.N. et al.** Mineral chemistry of lunar meteorite Dar al Gani 400 // Lunar and Planetary Science XXXI, 2000, CD-ROM, Abstract № 1252.
10. **Ivanov A., Zolensky M.** The Kaidun meteorite: where did it come from? // Lunar and Planetary Science XXXII, 2001, CD-ROM, Abstract № 1386.
11. **Taylor S., Lever J.H., Harvey R.P., Govoni J.** Collecting micrometeorites from the South Pole Water Well. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory Report, 1997, v. 97, № 1, 37 p.
12. **Taylor S., Brownlee D.E.** Cosmic spherules in the geologic record // Meteoritics, 1991, v. 26, p. 203—211.
13. **Дир У.А., Хауи Р.А., Зусман Д.** Пороодообразующие минералы, Т. 3, Листовые силикаты. М., Мир, 1966, 317 с.
14. **McSween H.Y., Grove T.L., Wyatt M.B.** Constraints on the composition and petrogenesis of the Martian crust // J. Geophys. Res., 2003, v. 108, № E12, p. 9—11.

15. **Russell S.S., Zipfel J., Folco L. et al.** The Meteoritical Bulletin, No. 87, 2003 July // Meteor. Planet. Sci., 2003, v. 38, № 7, p. 189—248.
16. **Anand M., Taylor L.A., Neal C.R. et al.** Petrogenesis of lunar meteorite EET 96008 // Geochim. Cosmochim. Acta, 2003, v. 67, № 18, p. 3499—3518.
17. **Taylor L.A., Misra K.C., Demidova S.I., Nazarov M.A.** KREEPy lunar meteorite Dhofar 287A: A new lunar mare basalt // Meteor. Planet. Sci., 2003, v. 38, № 4, p. 485—499.
18. **Соботович Э.В., Семенов В.П.** Вещество метеоритов. Киев, Наук. думка, 1984, 191 с.
19. **Курат Г., Брандштаттер Ф., Преспер Т. и др.** Микрометеориты // Геология и геофизика, 1993, т. 34, № 12, с. 148—164.

*Рекомендована к печати 2 февраля 2005 г.
Н.В. Соболевым*

*Поступила в редакцию 5 апреля 2004 г.,
после доработки — 24 января 2005 г.*