

УДК 550.2:552.6

## ПРИРОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ВЕЩЕСТВО АБЛЯЦИОННОГО СЛЕДА ВИТИМСКОГО МЕТЕОРОИДА (25 СЕНТЯБРЯ 2002 Г.)

© 2004 г. В. С. Антипин, С. А. Язев, академик М. И. Кузьмин, А. Б. Перепелов,  
С. В. Ефремов, М. А. Митичкин, А. В. Иванов

Поступило 25.05.2004 г.

В ночь на 25 сентября 2002 г. жителями Мамско-Чуйского и Бодайбинского районов Иркутской области наблюдался полет яркого болида, который сопровождался световыми и звуковыми эффектами, а также мощной воздушной волной, распространившейся на значительные расстояния. Несмотря на неблагоприятные погодные условия для наблюдения метеороида, многие очевидцы этого события отмечали постепенное появление равномерного белого яркого свечения на юго-западе, которое залило все небо и затем сместилось от долины р. Витим в северо-восточном направлении. Цвет этого свечения, по свидетельствам некоторых очевидцев, менялся с белого на синий и красновато-бордовый. По показаниям местных жителей, наблюдавших полет метеороида, полет сопровождался глухим гулом и завершился ударом и сотрясением земли.

Витимский метеороид вызвал множество акустических эффектов. Очевидцы указывали на звуковые явления, предшествовавшие и сопровождавшие свечение (шелест, шуршание, гул, как от самолета), которые могут быть связаны с возникновением в атмосфере электромагнитной волны.

Появлением сильного переменного электрического поля объясняется тот факт, что в жилых домах п. Мама на короткое время слабо загорелись лампы накаливания, хотя электроснабжение в это время здесь отсутствовало. Эти явления поз-

воляют относить Витимский метеороид к разряду электрофонных.

Объективная регистрация сейсмических явлений, связанных с падением Витимского метеороида, отсутствует. По данным Института динамики геосфер РАН (О.Н. Попова) на сейсмических станциях “Чара”, “Неляты” и “Пеледуй” севера Иркутской области на записях наблюдается слабый сигнал, который фиксирует локальное событие, приходящееся на это время. Полет метеороида был зарегистрирован спутниковой системой наблюдений США. Яркое свечение зафиксировано спутником на высоте около 62 км в точке с координатами  $57.21^\circ$  с.ш. и  $112.90^\circ$  в.д. и далее прослежено до высоты около 30 км с координатами  $58.21^\circ$  с.ш. и  $113.46^\circ$  в.д. По этим данным была реконструирована траектория падения метеороида, что позволило оценить угол ее наклона к горизонту (примерно  $34^\circ$ ).

В предполагаемом районе падения метеороида в 2002–2003 гг. работали три экспедиции, в которых участвовали сотрудники Института солнечно-земной физики (ИСЗФ), геохимии (ИГХ) и земной коры (ИЗК) СО РАН. В одной из экспедиций принимали участие ученые Комитета по метеоритам РАН и одновременно группы ученых и студентов из Екатеринбурга и Красноярска вели поиски метеоритного вещества. Ни одной из экспедиционных групп не удалось обнаружить кратеры либо фрагменты метеороида. Однако были обнаружены множественные повреждения леса вблизи трассы его полета (рис. 1). Наблюдались многочисленные обломанные вершины лиственных и хвойных деревьев, а также обломанные ветки и поваленные, иногда вместе с корнями, стволы диаметром у основания до 30–40 см. Согласно свидетельствам местных жителей, датировка этих повреждений леса по ряду очевидных признаков указывает на осень 2002 г. Согласно данным Гидрометеослужбы, ураганных ветров в этот период в регионе не отмечено.

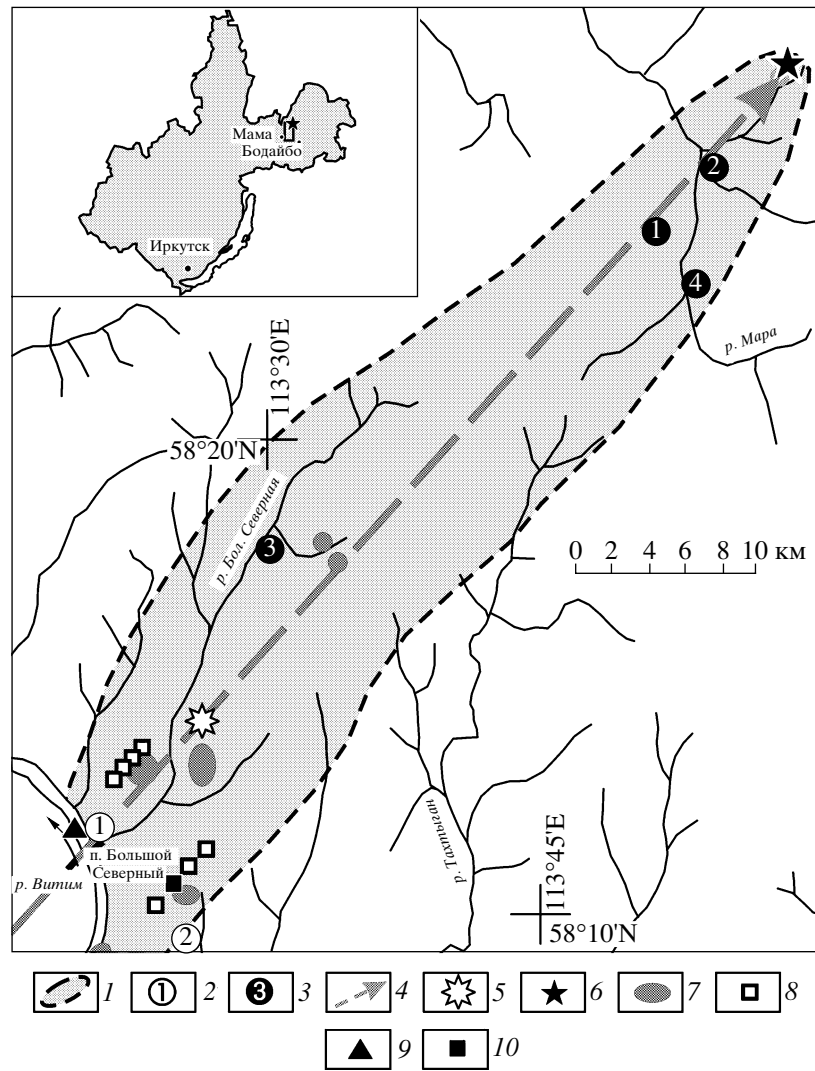
Механическое воздействие ударной волны летевшего в нижних слоях атмосферы метеороида

*Институт геохимии им. А.П. Виноградова,  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Иркутск*

*Институт солнечно-земной физики  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Иркутск*

*Астрономическая обсерватория  
при Иркутском государственном университете*

*Институт земной коры  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Иркутск*



**Рис. 1.** Схема района экспедиционных исследований и опробования снегового покрова в месте разрушения и предполагаемого падения Витимского метеороида. Условные обозначения: 1 – район экспедиционных исследований 2002–2003 гг.; 2 – зимние базы экспедиции 2003 г. (1 – п. Большой Северный, 2 – устье ручья Березового); 3 – летние базы экспедиции 2003 г. (1 – верховья левого притока р. Мары, 2 – устье ручья Мустаг, 3 – устье ручья Упорного, 4 – правобережье верхнего течения р. Мары); 4 – проекция расчетной траектории полета метеороида; 5 – проекция точки вспышки, зафиксированной спутником США; 6 – предполагаемое место падения метеороида; 7 – районы наблюдаемых повреждений и вывалов леса; 8 – места отбора проб снегового покрова; 9 – место отбора снега на льду р. Витим; 10 – место обнаружения сферул в пробах снегового покрова.

на окружающую природу является несомненным, хотя и вызывает ряд вопросов. Амплитуда волны, пришедшей с высоты 20–30 км, не должна быть существенной, что не согласуется с множеством поваленных и поврежденных деревьев.

Основная задача второй Витимской экспедиции в апреле 2003 г. заключалась в отборе снега в гольцовой части горного хребта вдоль траектории полета и вероятного падения метеороида. По данным метеорологической службы на вершинах гор снег к этому моменту уже лежал (2–5 см), и, следовательно, в самом нижнем его слое могли сохраниться частицы космогенного вещества.

В момент опробования толщина снегового покрова превышала 1.5 м. В пробы отбирался нижний слой снега (10–15 см), лежащий на мерзлом грунте, из расчисток площадью 1–2 м<sup>2</sup>. Всего было отобрано 13 проб снега на вершинах сопотой 1000 и более метров, включая фоновую пробу (снег со льда р. Витим).

Проекция трассы Витимского метеороида приходится на территорию Мамско-Чуйского района, где на современном эрозионном срезе распространены породы карбонатно-терригенной толщи мамской серии. Эти комплексы пород метаморфизованы в условиях амфиболитовой фации, а затем

**Таблица 1.** Представительные составы (мас. %) минеральных частиц абляционного следа Витимского метеороида (снеговой покров)

Компонент	Fe–Mn	Pu	Тэнит	Камасит
	1	2	3	4
Fe	77.85	31.52	28.3–75.0	91.0–96.5
Ni	Н.о.	1.21	21.5–70.6	2.5–8.4
Mn	0.40	Н.о.	Н.о.	Н.о.
S	Н.о.	50.90	То же	То же
Сумма	78.25	83.63	100.00	100.00
Компонент	Иллит	Ti–Fe	Amph	Fe–Ti
	5	6	7	8
SiO <sub>2</sub>	32.60	3.67	36.83	3.46
TiO <sub>2</sub>	1.41	46.31	5.18	20.31
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.90	3.10	10.56	2.41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.89	18.63	17.2	17.15
FeO	8.88	4.54	2.73	44.68
MnO	Н.о.	11.85	Н.о.	0.37
MgO	1.85	0.67	1.59	1.90
CaO	0.54	Н.о.	8.03	0.64
Na <sub>2</sub> O	0.55	То же	5.28	0.67
K <sub>2</sub> O	2.70	То же	1.80	0.28
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Н.о.	То же	2.45	Н.о.
Сумма	97.32	88.77	91.65	91.88
Σ К*	14	3	15	3
Σ А*	20	5	22	4
Баланс (±)	–4	0	–2	0

Примечание. Минеральные фазы: 1 – Mn-содержащее железо, 2 – Ni-содержащий пирит, 3 – тэнит и 4 – камасит (указан диапазон концентраций металлов по составам, приведенным к 100%), 5 – матрица сферулы с пористой структурой (иллит?) и 6 – включения Fe–Ti-минералов в “иллитовой” матрице (стехиометрия минералов группы псевдобрукита-армолколита), 7 – матрица сферулы амфиболового состава и 8 – включения в матрице Fe–Ti-минералов (стехиометрия шпинелидов). Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO рассчитано по стехиометрии. Σ К – сумма катионов, Σ А\* – сумма анионов. Баланс (±) – баланс анионов. Н.о. – не обнаружено.

испытали перекристаллизацию и анатексис с формированием многочисленных тел гранитов и слюдоносных пегматитов [1, 2].

При диагностике и исследовании минеральных частиц, полученных при фильтрации талой воды из проб 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 100–200 мкм. Обломки этих хрупких сферических образований имеют бурые и темно-бурые цветовые оттенки. С примене-

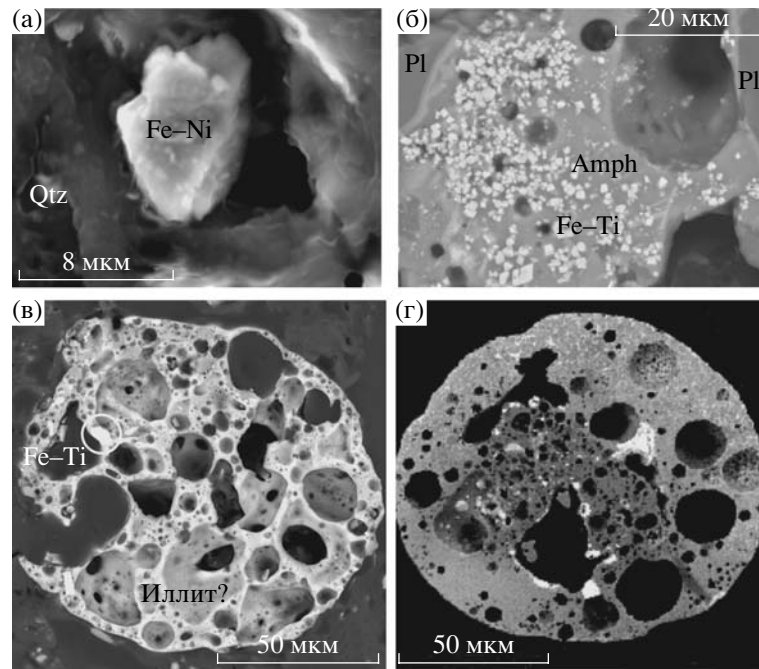
нием рентгеноструктурного анализа З.Ф. Ущиповской (ИЗК СО РАН) в веществе сферул были идентифицированы оксидные (шпинель, кристобалит) и силикатные (энстатит, нефелин) минералы. Все эти минеральные фазы встречаются в метеоритах, а именно, в хондритах [3].

Составы обнаруженных частиц из снегового покрова анализировали на электронном микроанализаторе “Jeol Superprobe-733” (Л.А. Павлова, Институт геохимии СО РАН) и с использованием электронного микроскопа “LEO 1430VP” фирмы “LEO” и энергодисперсионного анализатора “Inca Energy 300” фирмы “Oxford Instruments” (Н.С. Карманов, Геологический институт СО РАН; табл. 1). Полученные данные свидетельствуют о наличии среди микрочастиц как сульфидных, так и металлических фаз.

Обнаружены зерно Ni-содержащего пирита и частицы железистых соединений – окисленное и металлическое железо, никелистое железо. Частица пирита размером 3–4 мкм находится в ассоциации с частицей металлического Mn-содержащего железа среди “сажистого” материала. Частица никелистого железа размером 6 × 8 мкм ассоциирует с микрочастицей кварца (рис. 2а). Она неоднородна и состоит из участков металлического железа с примесью Ni и никелистого железа. Обнаруженные сульфидные и металлические фазы обычны для метеоритов, но известны также и в земных горных породах различного генезиса. Вместе с тем соотношения Ni и Fe в частице никелистого железа соответствуют характерным для метеоритного вещества минералам – тэниту и камаситу [4]. При сравнении этих данных с концентрациями железа и никеля в металлических частицах некоторых метеоритов (табл. 2) можно наблюдать, что они сопоставимы.

Присутствие в исследуемом веществе из снегового покрова в районе разрушения Витимского метеороида сферул с характерной пористой структурой и их сходство с микрометеоритами из других регионов мира [5, 6] (рис. 2г) свидетельствуют о вероятном метеоритном происхождении этих образований. Форма сферул и особенности их структуры не противоречат версии о том, что они могли выпасть из пылевого абляционного следа метеороида. Этот вывод следует также из анализа минеральных ассоциаций, обнаруженных в составе сферул, не свойственных коренным породам Мамско-Чуйского района.

В сферуле с пористой структурой установлены составы Fe–Ti-минералов (до 4 × 7 мкм), имеющих призматические формы (рис. 2в). Расчет кристаллохимических формул этих минералов с высокими концентрациями Mn, Fe, Ti и низкими Si и Al показывает несоответствие их стехиометрии таким оксидным фазам, как ильменит или шпинель. В то же время минерал обладает стехиоме-



**Рис. 2.** Частицы из снегового покрова в районе трассы полета Витимского метеороида в обратнорассеянных электронах. Изображения частиц: а – частица никелистого железа (Fe–Ni) и кварца (Qtz), б – обломок сферулы с матрицей амфиболового состава (Amph), плагиоклазами (Pl) и включениями Fe–Ti-минералов (шпинелидов); в – сферула с “иллитовой” матрицей и включениями Fe–Ti-минералов с псевдобрुकитовой стехиометрией; г – микрометеорит из снегового покрова Антарктиды [5].

трией при расчете на формулу  $X_3O_5$ , свойственную минералам группы псевдобрукита–армолколита. Состав вещества матрицы этой сферулы рассчитывается на формулы глинистых минералов и гидрослюд и может представлять собой смесь иллитового и монтмориллонитового компонентов. Матрица обломка другой сферулы размером  $>100 \times 100$  мкм (рис. 2б) представлена достаточно однородным минеральным соединением, содержащим мельчайшие кристаллические

выделения Fe–Ti-минералов (шпинелидов) и сростки игольчатых кристаллитов Ва-содержащих силикатов (до 15% Ва). В краевых зонах исследуемого обломка сферулы с контактами реакционного характера установлены кристаллы плагиоклазов с заметным содержанием железа. Полученный силикатный состав матрицы второй сферулы и его расчет на кристаллохимическую формулу амфибола показывает, что вещество может соответствовать минеральной смеси титанистого амфибола

**Таблица 2.** Состав никелистого железа (мас. %) в образцах некоторых метеороидов [4] и частицах из снегового покрова в районе разрушения Витимского метеороида

Метеорит	Камасит		Тэнит	
	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	92.0–92.5	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 метеороид*	91.0–96.5	2.5–8.4	28.3–75.0	21.5–70.6

\* Составы частиц из снегового покрова рассчитаны на 100%.

(керсутита) и Na–Ca-амфиболов. Как известно, щелочные амфиболы арфведсониты [7] и керсутиты [8] ранее были обнаружены в метеоритном веществе и реголитовых брекчиях. В некоторых случаях в метеоритах обнаружены и Ва-содержащие стекла [9].

Таким образом, проведенная диагностика обнаруженных в пробах снега частиц, исследование их минерального и химического состава показали, что они содержат вещество, которое встречается в метеоритах и вряд ли может быть отнесено к веществу горных пород Мамско-Чуйского района. При отсутствии не найденных пока фрагментов Витимского метеороида приведенные в сообщении данные являются единственным на сегодня вероятным свидетельством его вещественного состава.

Не менее важной является проблема достаточно мощной ударной волны во время падения метеороида, вызвавшей многие физические явления, в том числе повреждение деревьев.

Отметим также, что не следует переоценивать точность спутниковых определений координат падения (например, метеорит Моравка был найден в 20 км в сторону от проекции траектории падения, определенной по спутниковым данным). Не исключено, что основная масса фрагментов Витимского метеороида выпала дальше по траектории (если ошибочно определены высоты двух точек трассы падения) либо в стороне от расчетной траектории (если ошибочно определены их координаты).

Авторы выражают благодарность руководителям Мамско-Чуйского района Иркутской области, а также 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.

Исследования проводились при финансовой поддержке Сибирского отделения РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Неелов А.Н.* В сб.: 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. *Соботович Э.В., Семенов В.П.* Вещество метеоритов. Киев: Наук. думка, 1984. 191 с.
5. *Taylor S., Lever J.H., Harvey R.P., Govoni J.* Collecting Micrometeorites from the South Pole Water Well // US Army Cold Regions Res. and Eng. Lab. Rep. 1997. V. 97. № 1. 37 p.
6. *Taylor S., Brownlee D.E.* // Meteoritics. 1991. V. 26. P. 203–211.
7. *Ivanov A., Zolensky M.* // Lunar and Planet. Sci. 2001. V. 32. CD-ROM. Abstr. № 1386.
8. *Treiman A.* Amphibole in Martian Meteorite EET 79001. LX Annual Meteoritical Society Meeting. Hawaii, 1997. [www.lpi.usra.edu/meetings/metsoc97/pdf/5134.pdf](http://www.lpi.usra.edu/meetings/metsoc97/pdf/5134.pdf)
9. *Taylor L.A., Misra K.C., Demidova S.I., Nazarov M.A.* // Meteorit. and Planet. Sci. 2003. V. 38. № 4. P. 485–499.