

УДК 523.68

Химический и минеральный состав частиц яркого болида EN171101 «Турьи Реметы» в Закарпатье

Р.Я. Белевцев¹, К.И. Чурюмов², Э.В. Соболевич¹, С.Д. Спивак¹,
В.И. Блажко¹, В.И. Солоненко³, С.Б. Шехунова⁴, С.Н. Стадниченко⁴

¹Институт геохимии и окружающей среды НАН и МЧС Украины

²Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

³Винницкий государственный педагогический университет имени Михаила Коцюбинского

⁴Институт геологических наук НАН Украины

В 2007–2010 гг. были проведены поисковые минералого-геохимические исследования в районе падения яркого болида EN171101 «Турьи Реметы» в Перечинском районе Закарпаття. В 2010 г. на месте предполагаемого падения метеорита при проведении шлихового опробования ручьев были найдены многочисленные оплавленные магнитные шарики и сегменты довольно значительной величины — до 5 мм в поперечнике, которые вероятно являются частицами болида.

ХІМІЧНИЙ ТА МІНЕРАЛЬНИЙ СКЛАД ЧАСТИНОК ЯСКРАВОГО БОЛІДА EN171101 «ТУР'І РЕМЕТІ» У ЗАКАРПАТТІ, Белевцев Р.Я., Чурюмов К.І., Соболевич Е.В., Спивак С.Д., Блажко В.І., Солоненко В.І., Шехунова С.Б., Стадниченко С.Н. — У 2007–2010 рр. були проведені пошукові мінералого-геохімічні дослідження в районі падіння яскравого болида EN171101 «Тур'ї Ремети» у Перечинському районі Закарпаття. В 2010 р. на місці передбачуваного падіння метеорита при проведенні шліхового випробування струмків були знайдені численні оплавлені магнітні кульки й сегменти досить значної величини — до 5 мм у поперечнику, які ймовірно є частками болида.

CHEMICAL AND MINERAL COMPOSITION OF PARTICLES OF BRIGHT BOLIDE EN171101 «TURYI REMETY» IN ZAKARPATTA REGION, by Belevtsev R.Ya., Churyumov K.I., Sobotovich E.V., Spivak S.D., Blajko V.I., Solonenko V.I., Shehunova S.B., Stadnichenko S.N. — In 2007–2010 years mineralogo-geochemical search investigations were conducted in the area of bright bolide EN171101 «Turyi Remety» impact at Perechinsky region of Zakarpattia. In a year 2010 at the place of supposed meteorite impact under the shlikh examination of streams numerous melted magnet balls were found along with segments of quite considerable dimensions — up to 5 mm across, which represent supposingly the parts of bolide.

Ключевые слова: болиды; химический и минеральный состав метеоритов.

Key words: bolides; chemical and mineral composition of meteorites.

Болид EN171101 (Турьи Реметы) был сфотографирован с помощью словацких и чешских камер Европейской болидной сети (ЕС) 17 ноября 2001 г. в 16:52:44 UT [1] (рис. 1). Длина светящегося следа болида достигала 107 км. Он начинался на высоте 81.4 км в 10 км на юго-запад от украинского города Долина. Максимальной яркости — 18 абсолютной звездной величины болид достиг на высоте 30 км. Болид закончил свой путь на высоте 13.5 км вблизи села Турьи Реметы. Это самое глубокое проникновение болида в атмосферу Земли, снятого фотографической камерой. Начальная динамическая масса болида составляла 4300 кг, конечная масса после потерь на абляцию составила 370–450 кг. Орбита оказалась типичной для болидов глубоко проникающих в атмосферу Земли: $a = 1.33$ а.е., $e = 0.484$, $q = 0.684$ а.е., $\omega = 266.8^\circ$, $\Omega = 235.4^\circ$, $i = 7.4^\circ$. Поиски фрагментов метеороида с общей конечной массой 370 кг, проведенные в районе с. Турьи Реметы многочисленными экспедициями, к сожалению, пока не увенчались успехом.

Болид Турьи Реметы, параметры которого приведены в табл. 1, наблюдался с обсерваторий Словакии с расстояния около 260 км (начало болида) и 190 км (конец болида), со средним расстоянием 220 км под углом около 8.5° [1]. Зафиксированная картина болида (рис. 1) составляла 35% от истинной, которая наблюдается под углом 90° к его траектории (рис. 1). «Хвост» болида наклонен под углом $42–43^\circ$ к поверхности, а в завершающей фазе болид падает под углом около $35–36^\circ$ к поверхности. Т.е. болид после максимума заметно выполаживается, хотя по данным словацких астрономов это выполаживание составляет всего 0,7° (рис. 1). Поперечник болида составляет в максимуме около 5 км, а с ореолом отдельных светящихся частиц — до 10 км (рис. 1). Если продолжить путь метеороида после выклинивания болида до падения, то его след по территории составит 17–20 км. Т.е. метеорит может долететь почти до с. Невижское. Уточнение места падения метеорита «Турьи Реметы» или его частей является одной из основных задач настоящего исследования.

Таблица 1. Параметры болида Турьи Реметы

Parameters	Beginning	Terminal
Velocity (km/s)	18.482±0.014	3.8±0.2
Height (km)	81.37±0.13	13.5±0.2
Geographic longitude (° E)	23.7428±0.0015	22.671±0.003
Geographic latitude (° N)	48.9196±0.0015	48.733±0.003
Dynamic mass (kg)	4300	370
Slope to the surface (°)	40.0±0.2	39.3±0.2
Date and time of the maximum brightness (UT)	17.11.2001 v 16 ^h 52 ^m 46.7 ^s ±0.3 ^s	
Maximum absolute brightness	-18.5	
Total length of the luminous trajectory (km)	106.43	
Duration of the luminous trajectory (s)	6.87	

Одним из явных вещественных признаков болида Турьи Реметы в грунтовых пробах являются магнетитовые микросферы, диаметром 0.1 – 0.30 мм, содержание которых прослежено по магнитным фракциям шлиховых проб и проб почв. Эти шарики, сферической (реже эллиптической или каплевидной формы) обнаружены с преимущественной их концентрацией в пойме реки Уж от с. Заричево до с. Симер (рис. 2). Обычно шарики встречаются в одной пробе разных размеров, что позволяет предположить их медленное парашютирование в земной атмосфере после взрыва болида в безветренную погоду (рис. 2). Кроме того были найдены оплавленные обломки иоцита (FeO) (рис. 2) в районе п. Турьи Реметы, который весьма вероятно имеет космическое происхождение.

Проведен рентгено-спектральный микроанализ (РСМА) магнитных болидных шариков в Институте геологических наук НАН Украины на микроскопе Jeol JSM-6490LV, EDS Oxford. Большая часть проанализированных мелких болидных магнитных шариков (размером около 0,3 мм в поперечнике) из шлихов и почв бассейна р. Турья имеют состав, близкий к FeO. Некоторые шарики содержат мелкие включения с анортитом, герцинитом и фаялитом, а также небольшую примесь Cr, Ni, Cu. Округлые полости внутри шариков вероятно образованы при их кристаллизации из расплава, либо при газовой выделении.

Крупные частицы болида, проанализированные в 2011 г. можно разделить на несколько видов.

1) Темные силикатные шарики, размером около 1 мм (0,7 – 1,5 мм) нередко гладкие со светлыми шарообразными мелкими углеродистыми включениями или пустотами, размером 0,05 – 0,1 мм. В составе шариков преобладает магматическое стекло. Их химический состав, вес.% (обр. 3,7, 9,12): SiO₂ 35–50, Al₂O₃ 15–20, MgO 3–8, CaO 3–15, K₂O 1–3, Na₂O 1–3, FeO 10–30, что отвечает минеральному составу: анортит(Ан) + фаялит(Фа) + герцинит(Грц) реже Ан + кордиерит(Кор) + тридимит(Тр) + ортоклаз(Орт) + шпинель(Шп)±альбит(Аб); железистость частиц $F = 60–90$. Зональное строение в шариках обычно отсутствует, хотя выделения с преобладанием рудных кристаллов (существенно вюститовых), часто приурочиваются к краевым зонам шариков. Встречаются ясно зональные шарики (обр.9) с рудной каймой по краю, и с углеродистыми хондрами внутри.

2) Светлые серебристые шарообразные «бомбы» и полусферы, заметно обогащены железом по сравнению с силикатными шариками. Размер их — 0,7 – 2 мм в поперечнике, (обр. 6, 8, 10, частично 11 и 9). Преобладают рудные минералы. Химический состав частиц, вес.%: SiO₂ 15–30, Al₂O₃ 10–20, MgO до 2, CaO 4–6, K₂O 0,5–1, Na₂O до 0,5, FeO 50, который соответствует минеральному составу: Ан + Фа + вюстит(Вюс) + Грц. Рудные минералы (Вюс, Грц) преобладают над силикатными, есть углеродистые шарообразные включения с С, О, Н. Мелкие шарики (менее 0,3 мм в поперечнике) состоят в основном из вюстита.

3) Неправильной формы выделения магматического стекла, нередко сегменты. Крупные 2–3 мм до 5 мм. Преобладает черное рудно-силикатное стекло (обр.13, частично 11). Они близки по химическому составу к силикатным шарикам. Содержат многочисленные шарообразные пустоты, нередко выполненные углеродистым веществом.

Минеральный состав изученных образцов частиц болида может быть описан системой оксидов: SiO₂-Al₂O₃-FeO-CaO. CaO представляет анортит (15 – 40%), а систему SiO₂-Al₂O₃-FeO парагенезис Тр-Грц и Тр-Кор (первый и третий виды силикатных частиц болида) или парагенезис Фа-Вюс-Грц (второй вид железистых частиц болида).

Для температур плавления метеорита при образовании болидных частиц — около 1200°C в системе SiO₂-FeO устойчиво минеральное равновесие фаялит + кварц(тридимит), а не ферросилит (Фс). Т.е. равновесие реакции: Фа + Тр = 2Фс, смещено влево.

Особенности состава и структуры частиц болида зависят от однородности метеорита и характера процесса отделения и плавления частиц болида. Средний состав метеорита отвечает парагенезису фаялит-анортит-герцинит-шпинель, а состав частиц зависит от энергетики и степени плавления метеорита. При быстром плавлении значительных объемов метеорита состав частиц болида будет близок к среднему составу с повышенным содержанием SiO₂ и MgO, температура кристаллизации которых до-

стигает 1400°C . Такие болидные частицы будут иметь силикатный состав и пониженную железистость преобладающего силикатного стекла. При равновесном частичном плавлении состав частиц болида будет более низкотемпературным ($1100 - 1200^{\circ}\text{C}$) и более железистым со щелочами и близок ко второму виду частиц.

Метеорит «Турьи Реметы» содержал органику, что выразилось в выделении газов при плавлении частиц болида и образовании в них шарообразных пустот, которые часто выполняются минералами с С, О и Н — возможно это оксалаты, углеводороды, серпентин, графит. В целом, видимо, метеорит «Турьи Реметы» был близок к составу углистого хондрита.

Найденные при шлиховании ручьев в бассейнах рек Турья и Уж частицы болида резко отличаются по составу от кислых и средних кайнозойских вулканитов Закарпатья, а также от техногенных аэрозольных частиц, и, безусловно, имеют космическое происхождение, связанное с падением метеорита «Турьи Реметы».

Выводы. По данным шлихового и геохимического опробования на территории выделяется зона повышенных содержаний в шлихах Ni, Сг и Со примерно в полосе: г. Перечин — п. Симерки — п. Лумшоры, которая проходит в 3–5 км к северу от рассчитанной траектории болида [1], параллельно ей. Это может свидетельствовать либо об ошибке расчетов, либо о влиянии каких-то дополнительных факторов, например, ветра. Эти данные нужно учитывать при дальнейших поисковых работах.

Одним из известных признаков болидов являются магнитные шарики песчаного размера (диаметром 0,1–1,0 мм), которые часто встречаются в магнитной фракции шлихов. Эти шарики, вместе с оплавленными обломками иоцита (FeO) образуются при абляции болида, а их размеры уменьшаются по мере

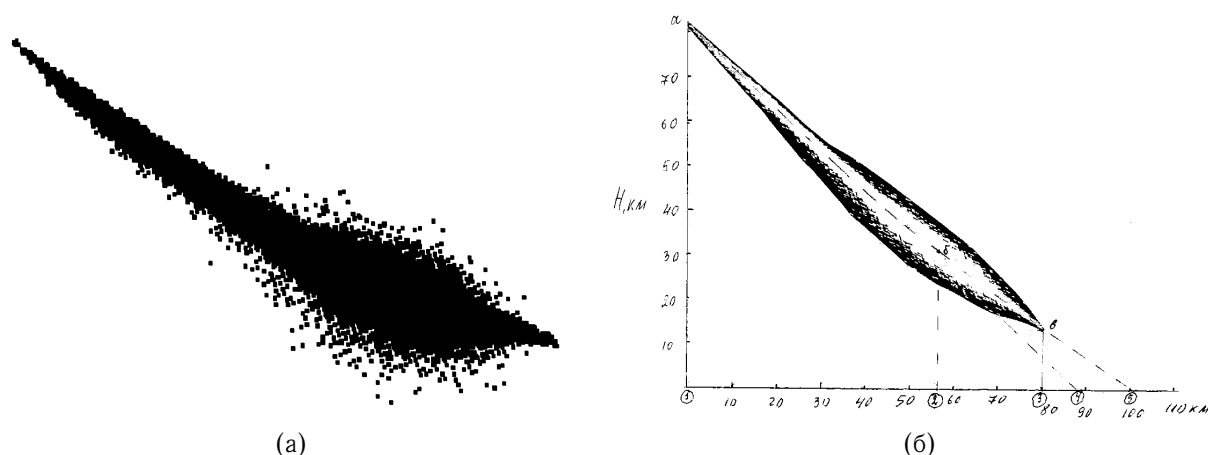


Рис. 1. а) Болид Турьи Реметы [11]. Длина траектории болида 106 км. Начало: высота (H) = 81,4 км, скорость (v) = 18,5 км/с, плотность воздуха (φ) = 0,01 г/м³, масса (m) = 4300 кг. Максимум болида: H = 30 км, v = 14 км/с, φ = 0,050 кг/м³. Выклинивание: H = 13,5 км, v = 3,8 км/с, φ = 0,20 кг/м³; б) Вид траектории болида Турьи Реметы под углом 90° . Параметры болида: а — начало (1 — проекция на поверхности); б — максимум (2 — на поверхности); в — выклинивание (3 на поверхности); 1–4 — начальная траектория болида; в-5 — траектория метеороида. 5 — предполагаемое место падения метеорита

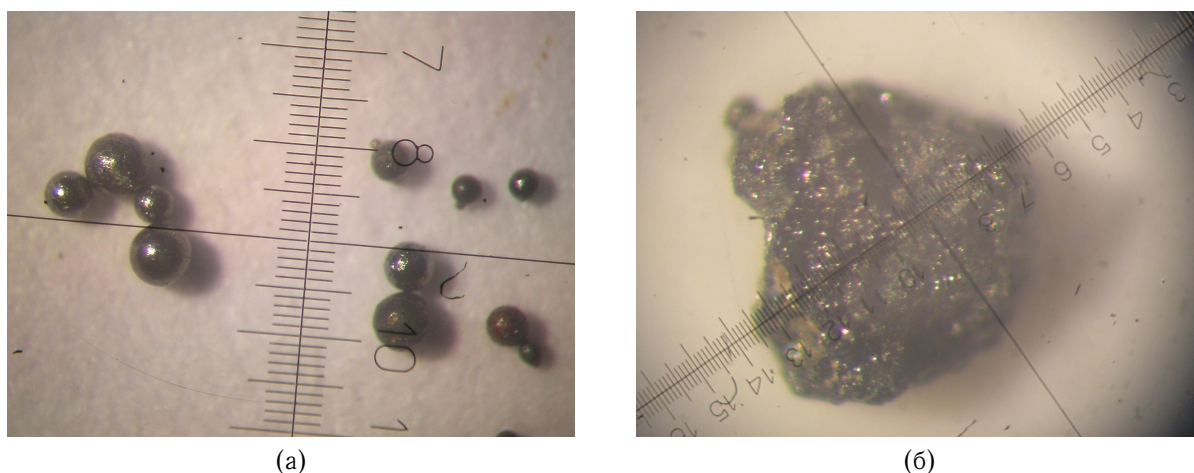


Рис. 2. а) Магнитные шарики из шлиховых проб нижнего течения р. Турья (п. Турьи Реметы — п. Симер) в пойме р. Уж (г. Перечин) — возможное вещество болида. Диаметр наибольшего шарика — 0,3 мм; б) Оплавленный обломок (2 мм в диаметре) иоцита (FeO)

движения метеороида, что и наблюдалось при поисковых работах. С востока на запад радиус таких шариков в районе исследований уменьшался в среднем от 0,7–0,5 мм до 0,1–0,3 мм. Размеры таких шариков, как светящихся расплавленных частиц болида, хорошо совпали с расчетными на основании потери энергии болида Турьи Реметы. Это подтверждает космическое происхождение таких шариков. Предварительно рассчитаны физические параметры движения болида — скорость, масса, кинетическая энергия, сила сопротивления при абляции, средний радиус частиц болида по траектории, пути движения частей метеороида в зависимости от массы и размеров. Быстрая потеря массы болида более чем в 10 раз, сильная, короткая абляция и затухание болида на большой высоте свидетельствует о неустойчивости метеороида и об участии газов в абляции. Возможно присутствие льда и других закристаллизовавшихся газов в составе метеороида, т.е. его состав был близок к кометному или к хондриту со льдом (газогидратом) [2]. Особенно вероятны газогидраты тяжелых газов, таких как CO₂, H₂S, углеводородов (пропан, бутан и др.) [3].

Дальнейшие поисковые работы рекомендуется провести в виде геохимических профилей через след болида: 1) Турья Поляна — Лумшоры, и 2) Турьи Реметы — Симерка, а также опосредованно вероятный район падения метеорита или его частей — левобережье р. Уж — п.п. Ворочево-Невицкое.

Учитывая вышесказанное, для изучения вещества, собранного при поисковых работах, необходимо использовать широкий спектр физико-химических лабораторных исследований, а также методы термодинамического анализа и математической статистики. Эти исследования помогут также оценить влияние падающих на Землю малых космических тел на окружающую среду.

1. *Spurny P., Porubchan V.* EN171101 Bolide — The deepest ever photographed Fireball // *Proceedings of Asteroid, Comets, Meteors (ACM 2002)*, 29 July – 2 August, Technical University Berlin, Germany, (ESA-SP-500), November 2002. — P. 269–272.
2. *Белевцев Р.Я., Бойченко С.Г., Спивак С.Д. и др.* Термодинамика газового обмена в окружающей среде. — Киев: Наук. думка, 2007. — 247 с.
3. *Клименко А.П.* Клатраты (гидраты газов). — Киев: Наук. думка, 1989. — 74 с.

Поступила в редакцию 24.10.2011