

МЕТЕОРИТИКА, ФИЗИКА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

С. Н. Замоздра

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧЕЛЯБИНСКОГО СУПЕРБОЛИДА

Представлен анализ данных о чрезвычайно ярком болиде, наблюдавшемся 15 февраля 2013 г. в 03:20 по всемирному времени в Челябинской области и соседних регионах. Указаны условия наблюдения болида, предложен сценарий его эволюции, рассчитаны высоты и эпицентры основных событий, на основе опроса очевидцев описаны электрофонные и электромагнитные эффекты.

Ключевые слова: болиды, электрофонный эффект, ударные волны.

1. Введение. Из космического пространства в атмосферы планет регулярно влетают метеороиды — твёрдые тела с характерными размерами от 0,1 мм до нескольких десятков метров [1], оставляющие в атмосфере короткоживущие светящиеся следы — метеоры. Наименьшая скорость входа метеороида в атмосферу планеты близка ко второй космической скорости. Большинство атомов и молекул в атмосфере планеты имеет тепловую скорость значительно меньше второй космической скорости, поэтому метеороид вторгается в атмосферу с гиперзвуковой скоростью и на столкновительном участке траектории порождает систему сильных ударных волн. На головной ударной волне воздух превращается в горячую плазму и, обтекая метеороид, нагревает его путём лучистого теплообмена и теплопроводности. Смешиваясь с испарениями метеороида, плазма воздуха образует светящийся след — метеор. Метеоры, превосходящие по яркости Венеру, называются болидами. Суперболидами называют болиды ярче –17-й звёздной величины [2].

15 февраля 2013 г. в 9 ч 20 мин по местному времени в Челябинской области и соседних регионах наблюдался суперболид, который создал мощные звуковые волны в воздухе, сейсмические волны и долгоживущий пылевой след в атмосфере. Суперболид вспыхнул над густонаселённым регионом, поэтому наблюдался тысячами людей и был заснят на видеокамеры с разных ракурсов. Метеоритный дождь, порождённый дроблением метеороида в атмосфере, выпал на территории нескольких муниципальных районов Челябинской области, поэтому вся совокупность упавших фрагментов была названа метеорит «Челябинск» [3].

В XX в. на территории Челябинской области наблюдались три ярких болида. 3 октября 1933 г.

в седьмом часу утра болид пролетел с запада на восток [4]. Последующий за болидом метеоритный дождь выпал примерно в 50 км восточнее г. Кургана на с. Старое Песьяное и оз. Маньяс (рис. 1). В коллекцию Академии наук удалось собрать 3,4 кг метеоритного вещества.

9 апреля 1941 г. в 5 ч утра жители Катав-Ивановского района наблюдали болид [5]. После этого появились сообщения о буром следе на снегу у с. Орловка на р. Катав. Однако научно подтверждённых находок метеорита до сих пор не было.

11 июля 1949 г. в 8 ч 14 мин в Свердловской, Челябинской, Курганской, Тюменской областях и Башкирской АССР наблюдался болид, который для близких очевидцев казался ярче солнца. Болид пролетел с севера на юг. За болидом последовали сотрясения почвы и построек, мощные звуковые волны, выпадение стёкол в некоторых домах и метеоритный дождь в Кунашакском районе Челябинской области. Самый крупный фрагмент метеорита «Кунашак», имевший массу около 118 кг, упал в 2 км южнее оз. Чебакуль. Аналогично фрагменту Челябинского метеорита, упавшему в оз. Чебаркуль, он раскололся на несколько частей (масса самой большой части 63 кг) [6].

Метеориты «Старое Песьяное» и «Кунашак» являются каменными. Близкое к г. Челябинску падение железного метеорита произошло 17 мая 1990 г. в 23 ч 25 мин в 20 км к западу от г. Стерлитамака (Башкирия). Масса самого крупного фрагмента метеорита «Стерлитамак» 315 кг [7].

В настоящей работе описываются характеристики болида, вызванного падением метеорита «Челябинск». На основе видеозаписей анализируется эволюция болида и распространение ударных волн, представлены данные об

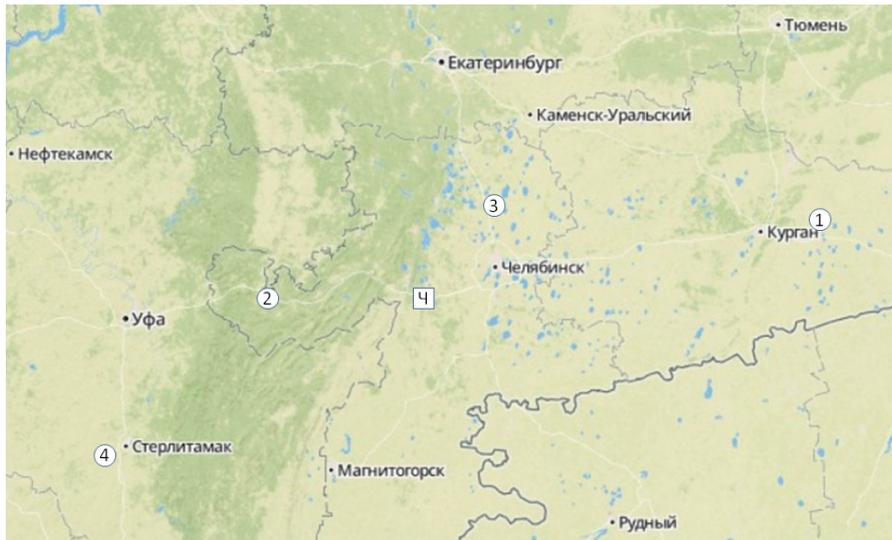


Рис. 1. Места падения метеоритов на Южном Урале и в соседних регионах в XX в.: 1 — Старое Песьяное, 2 — Катавский болид, 3 — Кунашак, 4 — Стерлитамак и «Ч» — Челябинск, 15.02.2013

электрофонных и электромагнитных эффектах. Некоторые характеристики болида основаны на воспоминаниях автора и очевидцев события, опрошенных автором.

2. Условия наблюдения болида. В отсутствие облачного покрова и высоких препятствий Челябинский болид мог наблюдаться с земли на расстоянии около 800 км, на что указывает видеозапись, сделанная в Самарской области возле села с символическим названием Просвет [8]. Расстояние от этой точки до с. Еманжелинка в Челябинской области 754 км. На таком расстоянии видны объекты, находящиеся на высоте более 40 км. В семи субъектах Российской Федерации (Курганской, Оренбургской, Самарской, Свердловской, Тюменской, Челябинской областях, Республике Башкортостан), а также в Республике Казахстан болид наблюдался визуально и запечатлён на видеозаписях. В Пермском крае было замечено и запечатлено на видеорегистраторе только резкое увеличение яркости неба во время вспышки болида [9].

На Южном и Среднем Урале и на севере Казахстана наблюдению болида способствовали несколько факторов:

- малооблачная погода (обширный антициклон);
- отсутствие высоких гор;
- идеальное время: позднее утро (люди бодрствуют), сумерки, много движущихся автомобилей (включены видеорегистраторы).

3. Эволюция болида. Одна из наиболее удачных видеозаписей болида была сделана в Каменске-Уральском [10]: почти вся эволюция болида здесь снята видеорегистратором в остановившемся автомобиле, кроме того, в кадр попало много ориентиров (рис. 2). Возникновение болида на утреннем небе лучше всего видно на видеозаписи [11].

На основе этих данных можно построить следующий сценарий эволюции болида (табл. 1).

Он возникает ($t = 0$) как светящаяся точка. С первой секунды болид оставляет заметный хвост и до $t = 7$ с похож на головастика (рис. 2, «7 секунд»). Постепенно голова болида увеличивается, и на интервале времени $t = 7,5–11,5$ с он более похож на шар с тонким хвостиком. При $t = 9$ с происходит первая вспышка болида. Возможно, она вызвана первым крупномасштабным дроблением метеороида. Это предположение согласуется с резким увеличением толщины болидного хвоста. Действительно, при $t = 10$ с хвост можно разделить на два сегмента существенно отличающихся по толщине: у ближнего к голове сегмента она приблизительно в три раза больше, чем у дальнего. На рис. 2 («10 секунд») этот переход обозначен кружком. Видеозапись в Каменске-Уральском показывает, что начало первой вспышки было в этом же месте.

Основная вспышка происходит в интервале $t = 10–12$ с. Она ослепительно яркая. В конце основной вспышки начальный болид (далее № 1)

Таблица 1

Эволюция болида на видеозаписях [10; 11]

Время, с	Диаметр головы, у. е.*	Длина, у. е.*	Вид и изменения болида
0,0	0,5	0,5	Точка
1,0	1	2,5	Головастик (есть голова и хвост)
2,0	2	6	Головастик
2,5	2	8	
3,0	3	11	Головастик с несколькими лучами от головы (артефакты)
3,5	3	13	
4,0	3	16	
4,5	3	19	
5,0	3,5	22	
5,5	4,5	25	
6,0	6	28	
6,5	8	31	
7,0	9	37	
7,5	10	40	
8,0	14	52	
8,5	18	58	
9,0	25	70	
9,5	22	68	
10,0	35	80	Шар с лучами и немонотонным хвостом (два сегмента с отношением толщин ≈ 3)
10,5	54	104	
11,0	67	98	Шар с лучами
11,5	27	97	Шар с тонким хвостом и лучами
12,0	12	98	Головастик с конической головой
12,5	5	110	Отделение болида № 2, след болида № 1 имеет толщину до 3,5 у. е.
13,0	1,5	119	Полёт болида № 2 (голова коническая). След болида № 1 имеет толщину до 2 у. е. и начинает вытягиваться
13,3	1	122	Отделение трёх болидов № 3 от болида № 2
14,0	1	136	Угасание одного из болидов № 3 и слияние двух других. След болида № 1 ещё светится и прекращает вытягиваться. Болид № 2 погас
14,3	1	141	След болида № 1 имеет толщину 2 у. е. и раздваивается
14,6	1	143	
14,8	0,5	146	
15,6			Последний из болидов № 3 погасает
19,0			След болида № 1 погасает (остыл)

* Диаметр головы и длина болида (с хвостом) измерены линейкой на дисплее и поэтому даны в условных единицах.



Рис. 2. Эволюция Челябинского суперболида: избранные кадры видеозаписи в Каменске-Уральском [10].
На кадре «10 секунд» кружок указывает область начала первой вспышки. На кадре «15 секунд» звёздочка указывает область максимума основной вспышки, а кружок — область окончания регистрации болида (начало; окончание см. на с. 10)

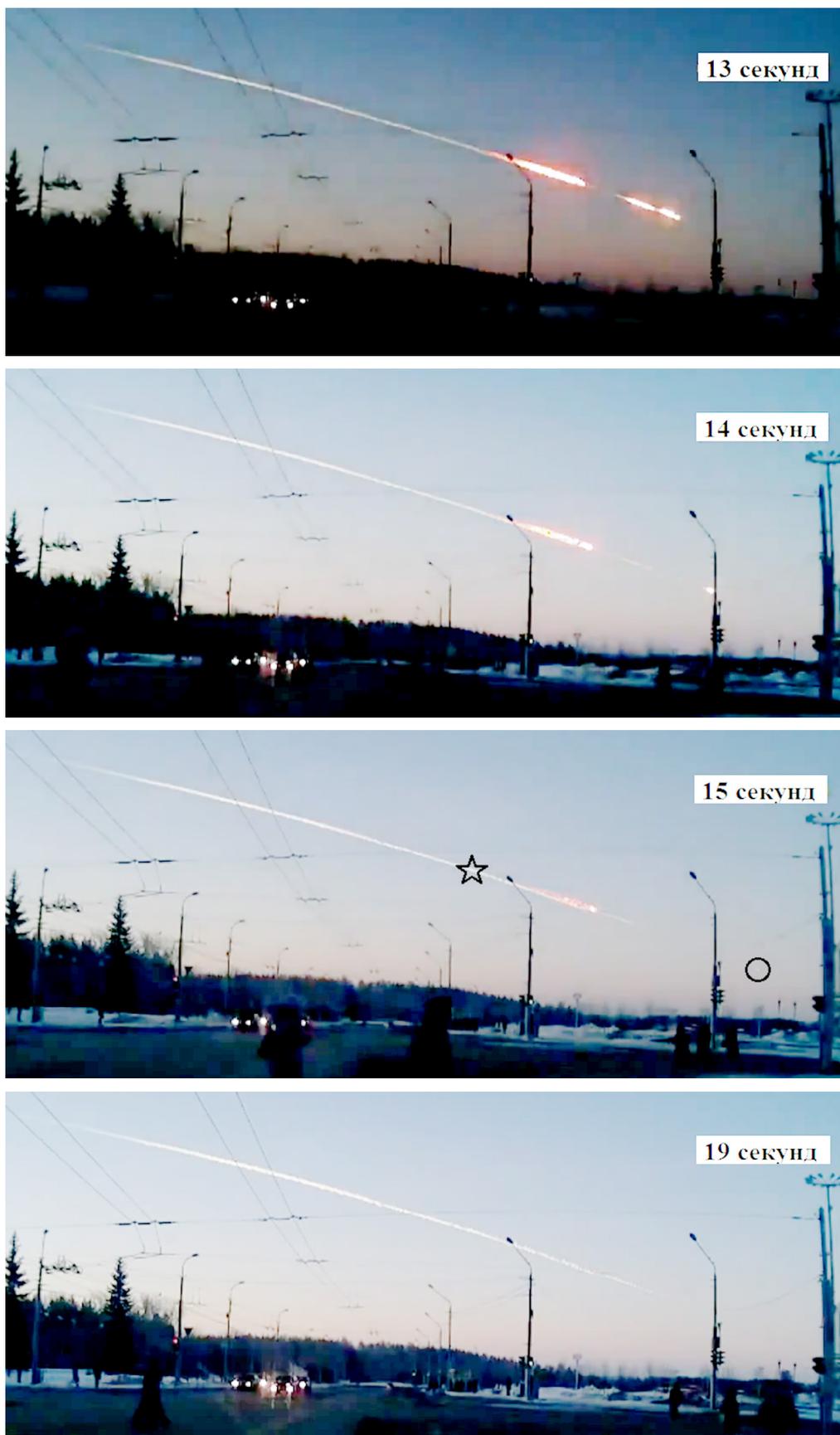


Рис. 2. Окончание (начало см. на с. 9)

похож на головастика с конической головой (рис. 2, «11 секунд»). За доли секунды голова болида № 1 превращается из конуса в веретено и от неё отделяется новый болид (далее — болид № 2, рис. 2, «12 секунд»). Через 0,6 с после отделения болида № 2 веретено болида № 1 начинает вытягиваться и спустя секунду становится на 15 % длиннее. Пролетев секунду, болид № 2 повторяет судьбу болида № 1 — вспыхивает, тормозится и порождает цепочку (поезд) из новых болидов (далее болиды № 3, рис. 2, «13 секунд»). На видеозаписи [12], сделанной в центре Челябинска, хорошо видно формирование этой цепочки. В её голове находятся самые яркие болиды. При $t = 14$ с один из ярких болидов № 3 угасает, а два других ярких болида № 3 будто сливаются; след болида № 1 ещё светится и прекращает вытягиваться; болид № 2 погас (рис. 2, «14 секунд»). Последний из болидов № 3 угасает при $t = 15,6$ с — видимая фаза полёта заканчивается (рис. 2, «15 секунд», кружок).

Самый толстый участок следа от болида № 1 светился около 6 с после пролёта метеороида на этом участке. Остывая, толстый участок следа от болида № 1 погасает при $t = 19$ с (рис. 2, «19 секунд»).

Графики временных зависимостей диаметра головы и длины болида (с хвостом), сделанные на основе табл. 1, показаны на рис. 3. Диаметр головы болида всё время остаётся меньше длины болида и имеет два максимума: при $t = 9$ с и $t = 11$ с. Длина болида увеличивается нелиней-

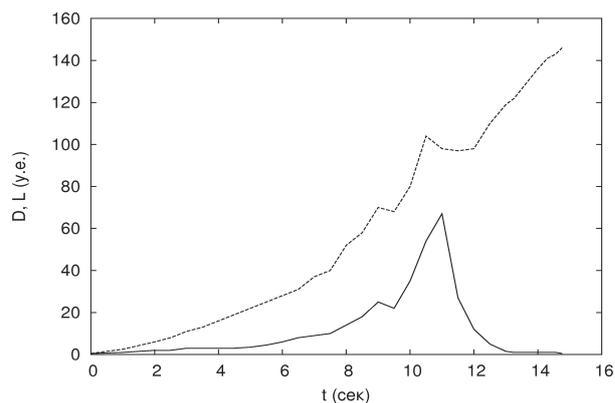


Рис. 3. Изменения диаметра головы (сплошная линия) и длины болида с хвостом (штриховая линия) в условных единицах со временем

но, что вызвано не только движением болида, но и его вспышкой.

4. Траектория болида. Азимут траектории болида можно достаточно точно оценить по времени распространения ударных волн (п. 8) и точкам падения крупных метеоритов. Видеозаписи с рынка в г. Коркино и администрации г. Еманжелинска (табл. 2) показывают почти одинаковое время распространения ударных волн, поэтому проекция траектории проходит почти посередине между этими точками съёмки. Вторая надёжная привязка — полынья в оз. Чебаркуль от падения крупного фрагмента. Следовательно, проекция траектории (рис. 4) имеет азимут 284° и проходит через населённые пункты Потапово, Белоносово, Сары, Берёзки, Чебаркуль.

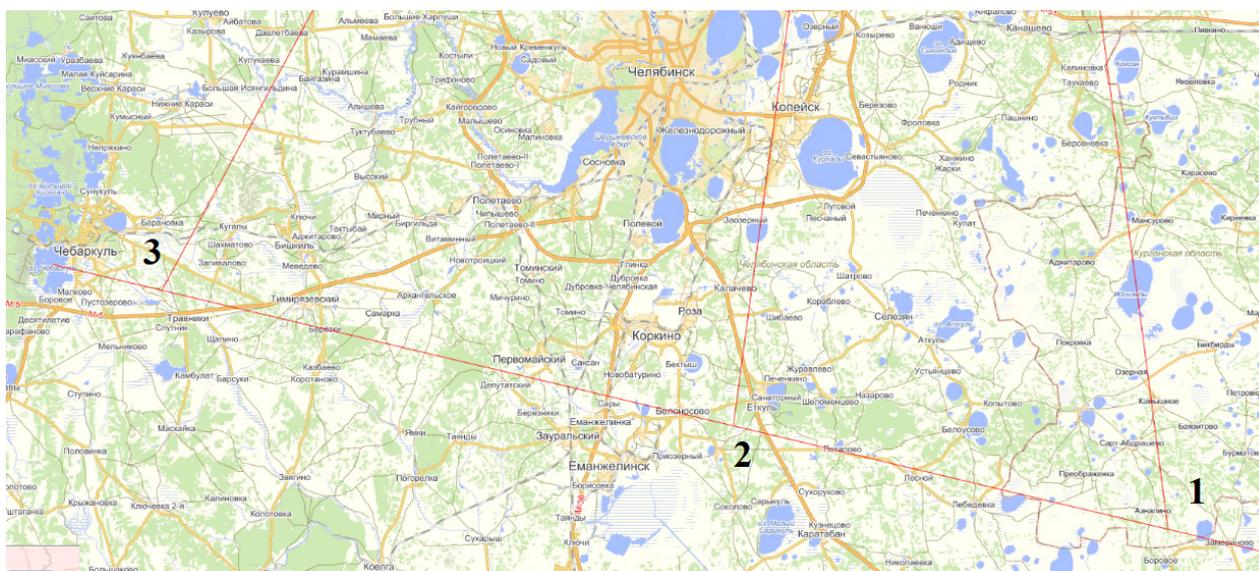


Рис. 4. Проекция траектории метеороида и лучей зрения из г. Каменска-Уральского на Яндекс-карте в направлении на зоны трёх событий: начало первой вспышки (1), максимум основной вспышки (2), окончание регистрации болида (3)

Таблица 2

Оценка кратчайшего расстояния до болида по времени распространения ударной волны со средней скоростью 313 м/с

№	Время, с	Место	Путь, км	URL (автор)
1	150	Челябинск, ул. Свободы, 14	47,0	https://www.youtube.com/watch?v=rszpCJa6Xjg&feature=player_detailpage (Podlymen)
2	141	Челябинск, Привокзальная площадь	44,1	https://www.youtube.com/watch?feature=player_detailpage&v=Qin411P9r2U (Live камера, Интерсвязь)
3	89	Коркино, рынок	27,9	https://www.youtube.com/watch?feature=player_detailpage&v=odKjwrjIM-k (нек розато)
4	139	Челябинск, ул. Батумская/Дзержинского	43,5	https://www.youtube.com/watch?feature=player_detailpage&v=efvP-RRuJuA (ryshkovoi)
5	92	Еманжелинск, администрация	28,8	Камера внутреннего наблюдения

По видеокдрам, на которых луч зрения почти перпендикулярен траектории, можно измерить угол её наклона относительно горизонтали. Например, по видеозаписи [10] из Каменска-Уральского находим, что прямой участок траектории, где ещё несущественно торможение, наклонён к горизонтали на 16° .

Зная проекцию траектории, можно найти координаты основных событий в эволюции болида (рис. 4). С помощью видеозаписи [13] по кадрам в районе пересечения ул. Бейвеля и Профессора Благих мы оценили расположение зоны начала регистрации болида. Она находится на высоте 97 км над Мендыкаринским районом в Костанайской области Республики Казахстан, в 4 км на юго-запад от с. Озёрное в Звериноголовском районе Курганской области. Расстояние по земле от этой зоны до места падения фрагмента в оз. Чебаркуль 280 км, до точки видеосъёмки — 230 км. Большая высота начала регистрации болида типична в случае падения крупных метеороидов (см. табл. 4.1 в [2]), поскольку возле них образуется большая плазменная кома.

С помощью видеозаписи [10] из Каменска-Уральского мы нашли координаты других значимых событий в эволюции болида. Высота столбов у перекрёстка принималась равной 9 м. Начало первой вспышки болида было на высоте 45 км над границей между Курганской и Челябинской областями вблизи населённых пунктов Азналино и Боровое (рис. 4, 1). Максимум основной вспышки находился на высоте 34 км в 4 км на юго-запад от с. Еткуль Челябинской области (рис. 4, 2). Точка окончания регистрации болида находится на высо-

те 17 км в 3 км на северо-запад от с. Травники Челябинской области (рис. 4, 3). Заметим, что по видеозаписи [13] эта точка находится на высоте 13 км в 2 км к северу от с. Травники. С учётом погрешностей измерений, видеозаписи [10; 13] показывают одинаковые зоны окончания регистрации болида.

По видеозаписи [10] видно, что окончание самой толстой части следа находится на 25 км дальше положения максимума основной вспышки (обозначено звездой на рис. 2, «15 секунд»). Учитывая, что вещество самой толстой части следа формировалось на протяжении всей вспышки, можно предположить, что большинство участков струи плазмы, образованной воздухом и парами метеороида, продвинулись до торможения приблизительно на 20 км — до пос. Первомайского Коркинского района, где и произошёл наиболее интенсивный метеоритный дождь.

5. Световое воздействие болида. Близкие очевидцы болида, например, Александр Полонский из Еманжелинска, отмечают, что главная вспышка болида была ослепительно яркой, поэтому многие из них отвернулись от источника света. В работе [14] сделан вывод о том, что вблизи траектории яркость главной вспышки превышала солнечную, причём доля ультрафиолетового излучения оказалась достаточно велика, чтобы в ряде случаев вызвать солнечные ожоги.

Предположение о значительной доле ультрафиолетовой компоненты в спектре болида согласуется с наблюдением автора, что в момент главной вспышки комната осветилась холодным белым светом.

Ультрафиолетовая компонента излучения болида могла вызвать фотохимические реакции в воздухе и частичное испарение пылинок. Возможно, этим вызвано возникновение неприятных запахов, отмеченное некоторыми наблюдателями болида.

6. Электрофонные эффекты. Подобно Кунашакскому болиду [6] Челябинский болид оказался электрофонным, т. е. сопровождался звуками во время полёта. Автором были опрошены три очевидца болида, слышавших такие звуки.

Евгений Светлов — глава Еманжелинского муниципального района (дипломированный инженер-электрик, возраст 39 лет) — сообщил, что, находясь в своём офисе в Еманжелинске во время основной вспышки болида, он услышал звук, похожий на гудение электрического трансформатора.

Александр Полонский — водитель из администрации Еманжелинского муниципального района (возраст около 45 лет) — сообщил, что, находясь на улице в Еманжелинске, он услышал звук, похожий на рокот реактивных самолётов-истребителей, и только затем заметил болид.

Владимир Бычков — программист из полиции (дипломированный физик, возраст около 43 лет) — сообщил, что, находясь в сквере областной больницы во время яркой фазы эволюции болида, он услышал звук, похожий на шипение масла на горячей сковороде. Звук шёл со стороны болида. В момент основной вспышки шипение прекратилось, но возник звук, похожий на хлопок при перегорании лампы дневного света.

В момент наблюдения болида очевидцы были без очков, но рядом с ними были диэлектрические предметы: возле Евгения Светлова — столы и шкафы из ДСП, стекла, возле Александра Полонского и Владимира Бычкова — стекла автомобилей и дерева.

7. Электромагнитные эффекты. Телеоператор челябинского областного канала «ОТВ» Иван Генералов сообщил, что во время главной вспышки болида пропал сигнал с радиомикрофона, но через 1–2 с возобновился. Место происшествия — офис на втором этаже в центре Челябинска.

Первый заместитель главы Еманжелинского муниципального района Павел Демин сообщил, что во время полёта болида стали мерцать лампы в уличных фонарях. Вместе с этим, по информации энергосетевых организаций «АЭС

Инвест» и «МРСК Урал», скачка напряжения на электросетях и отключений электроэнергии в момент падения метеорита не отмечалось.

8. Эволюция следа. Клубящийся слегка светящийся дымный след — это было первое, что увидел автор на утреннем небе, выглянув в окно после главной вспышки болида. Конвективная неустойчивость вызвала раздвоение следа болида и формирование грибовидного облака. Это облако возникло в зоне торможения остатков метеороида благодаря быстрому подъёму горячего пузыря, состоящего из плазмы воздуха, а также паров и пылевых частиц метеороида. Подъём начался на высоте около 23 км со скоростью до 180 м/с [15], что эквивалентно сильнейшему урагану. Он мог подбросить вверх камни размером до нескольких сантиметров.

Тысячи тонн пыли от разрушенного метеороида были разнесены воздушными течениями в стратосфере на высотах 25–45 км со средней скоростью 85 м/с [16]. В итоге за несколько дней в северном полушарии на широтах 50–70° сформировалось аэрозольное кольцо, которое оставалось заметным следующие 3 месяца.

9. Ударные волны. Большинство очевидцев, в том числе и автор, ощутили серию ударных волн, пришедших через несколько минут после пролёта болида. Причём первую волну все считают наиболее сильной. По шатанию видеокамеры [17] проявляются три ударных волны.

Пологая траектория благоприятствовала долгому и плавному преобразованию кинетической энергии метеороида в тепловую энергию плазмы болида. Плазменный след растянулся на сотню километров, поэтому ударные волны, порождённые его быстрым расширением (взрывом), были наименее разрушительными.

Выбивание стёкол и рам в населённых пунктах, находящихся вблизи средневысотного участка траектории болида, указывает на скачок давления 0,05 атмосферы в ударных волнах на уровне земли.

Расстояние от источника волн до точек регистрации можно оценить по времени распространения волн, если задавать их скорость в качестве параметра. Поскольку амплитуда волн мала, их скорость близка к скорости звука, c_s . Полагая, что средняя температура на пути из стратосферы в зимнюю тропосферу $-30\text{ }^\circ\text{C}$ и соответствующая средняя скорость звука $c_s = 313\text{ м/с}$, получаем оценки расстояния для пяти точек регистрации (см. табл. 2).

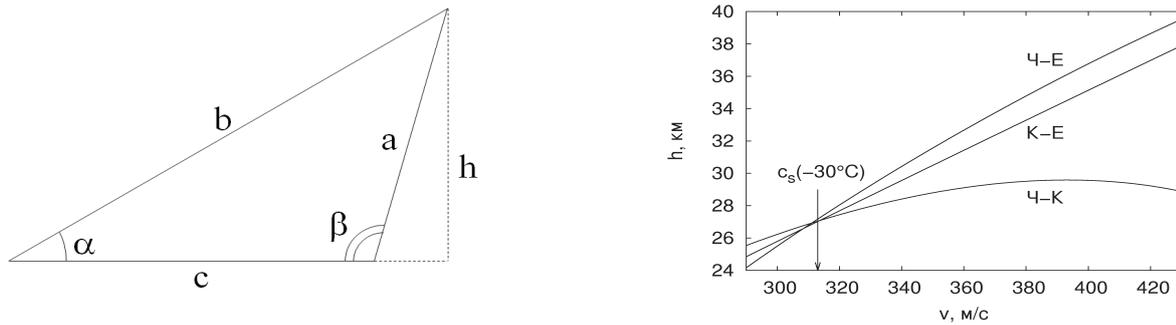


Рис. 5. Оценка высоты болида на участке траектории между Коркино и Еманжелинском по времени прибытия ударной волны:

слева — геометрия задачи: основание треугольника известно, две других стороны и высота вычисляются по времени прихода ударной волны; справа — зависимость высоты от средней скорости ударной волны для трёх треугольников, основания которых соединяют три точки регистрации — в Челябинске, Коркино и Еманжелинске

Поскольку расстояния между точками регистрации известны, можно по теореме косинусов найти высоту h источника волн (рис. 5). Например, для трёх вертикальных треугольников, основания которых соединяют три точки: в Челябинске, Коркино и Еманжелинске, графики $h(c_s)$ почти пересекаются при $c_s = 313$ м/с, что указывает, на единый источник волн во всех этих точках и одинаковые параметры атмосферы на пути волн. Соответствующая высота болида на участке траектории между Коркино и Еманжелинском составляет 27 км.

10. Заключение. Челябинский болид, наблюдавшийся 15 февраля 2013 г. в 03:20 по всемирному времени в Челябинской области и соседних регионах, считается вторым по энергии взрыва (500 кт в тротиловом эквиваленте) после Тунгусского болида 1908 г.

Анализ наблюдательных данных о Челябинском болиде показал следующее. Болид относится к суперболидам, поскольку был много ярче –17-й звёздной величины. Условия его наблюдения на Южном и Среднем Урале и на севере Казахстана можно считать идеальными: малооблачная погода, отсутствие высоких гор, позднее утро (люди бодрствуют), сумерки, много движущихся автомобилей (включены видеорегистраторы). Наиболее удалённая видеозапись болида сделана в Самарской области (754 км до с. Еманжелинка в Челябинской области).

Видимая стадия эволюции болида длилась долго — 16 с, что вызвано малым углом входа относительно горизонта (около 16°). У болида отчётливо выделяются три стадии эволюции, которые выглядят как рождение новых поко-

лений болида из старых. Когда болид первого поколения почти затормозился и погас, из него вылетел болид второго поколения. Он, в свою очередь, при торможении и угасании породил группу (поезд) болидов третьего поколения.

Высота зоны начала регистрации болида — 97 км, начала первой вспышки — 45 км, максимума основной вспышки — 34 км, окончания регистрации — 17 км. Эпицентр основной вспышки находился в нескольких километрах к юго-западу от с. Еткуль Челябинской области.

Полёт болида сопровождался электрофонными эффектами и помехами в радиосвязи. Кроме того, анализ задержки сигналов от спутников системы GPS показал, что болид изменил лучевую концентрацию электронов в ионосфере [18]. Анализ отражения радиоимпульсов от ионосферы показал, что после болида концентрация электронов могла вырасти в 2,7 раза на высотах до 250 км в течение 1–1,5 ч [19].

Падение метеорита «Челябинск» стимулировало переоценку частот столкновений метеороидов с Землёй. Например, по расчётам Брауна и др. [20], основанным на данных о воздушных взрывах, частота вторжения тел с размером 10–50 м на порядок выше оценки, основанной на других методах. Это может означать, что распределение размеров метеороидов, сближающихся с Землёй, не является равновесным либо методы оценки частот столкновений дают высокую погрешность для тел с такими размерами. Поэтому необходимо активизировать изучение небесных тел декаметрового размера, которые многочисленны, трудно обнаруживаемы и опасны.

Автор благодарит профессора А. Е. Дудорова за стимулирование исследований, ценные замечания и уточнения; Дмитрия Бадюкова — за предоставление подборки статей; Евгения Светлова, Александра Полонского, Павла Демина, Владимира Бычкова и Ивана Генералова — за подробные рассказы о ярком событии.

Список литературы и источников

1. Beech, M. On the definition of the term 'meteoroid' / M. Beech, D. Steel // Q. J. R. astr. Soc. 1995. Vol. 36. P. 281–284.
2. Катастрофические воздействия космических тел / под ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчинова. М. : Академкнига, 2005. 310 с.
3. The Meteoritical Society. URL: <http://www.lpi.usra.edu/meteor/>
4. Егурная, И. С. Метеорит «Старое Песьяное» над Челябинском [Электронный ресурс]. URL: http://resources.chelreglib.ru:6005/el_izdan/kalend2008/meteorit.htm
5. Егурная, И. С. Катавский болид [Электронный ресурс]. URL: http://urbibl.ru/Stat/Meteoriti/katavskiy_bolid.htm
6. Зоткин, И. Т. Исследование условий падения каменного метеоритного дождя «Кунашак» / И. Т. Зоткин, Е. Л. Кринов // Метеоритика. 1958. Вып. 15. С. 51–81.
7. Юсупов, С. Ш. Метеорит «Стерлитамак» [Электронный ресурс]. URL: // <http://ufa-gid.com/encyclopedia/meteor.html>
8. Метеорит под Новокуйбышевском [Электронный ресурс]. URL: http://www.youtube.com/watch?v=n4tDkMKSEK0&feature=player_embedded
9. URL: <http://iskra-kungur.ru/onelane/6510-v-kungure-tozhe-videli-padenie-meteorita.html>
10. Взрыв метеорита над Челябинском 15.02.2013 [Электронный ресурс]. URL: https://www.youtube.com/watch?feature=player_detailpage&v=iCawTYPtehK
11. Взрыв метеорита над Челябинском [Электронный ресурс]. URL: https://www.youtube.com/watch?feature=player_detailpage&v=cGyQIw899dQ
12. Взрыв болида, Челябинск, 15.02.2013 [Электронный ресурс]. URL: http://www.youtube.com/watch?v=K5J_xEWIGPo&feature=player_detailpage
13. Метеоритный дождь над Челябинском [Электронный ресурс]. URL: https://www.youtube.com/watch?feature=player_detailpage&v=HLVjkv98m9g
14. Popova, O. P. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization / O. P. Popova, et al. // Science. 2013. Vol. 342. P. 1069–1073.
15. Горькавый, Н. Н. Аэрозольный шлейф Челябинского болида / Н. Н. Горькавый, Т. А. Тайдакова, Е. А. Проворникова, И. Н. Горькавый, М. М. Ахметвалеев // Астрон. вестн. 2013. Т. 47, № 4. С. 299–303.
16. Gorkavyi, N. New stratospheric dust belt due to the Chelyabinsk bolide / N. Gorkavyi, D. F. Rault, P. A. Newman, A. M. da Silva, and A. E. Dudorov // Geophys. Res. Lett. 2013. Vol. 40. P. 4728–4733.
17. Метеорит в Челябинске (съёмка камеры наблюдения) [Электронный ресурс]. URL: https://www.youtube.com/watch?feature=player_detailpage&v=efvP-RRuJuA
18. Гохберг, М. Б. Челябинский метеороид: отклик ионосферы по измерениям GPS / М. Б. Гохберг, Е. В. Ольшанская, Г. М. Стеблов, С. Л. Шалимов // Докл. Акад. наук. 2013. Т. 452, № 2. С. 208–212.
19. Гивишвили, Г. В. Ионосферные эффекты, стимулированные Челябинским метеоритом / Г. В. Гивишвили, Л. Н. Лещенко, В. В. Алпатов, С. А. Григорьева и др. // Астрон. вестн. 2013. Т. 47, № 4. С. 304–311.
20. Brown, P. G. 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors / P. G. Brown, J. D. Assink, L. Astiz, R. Blaauw // Nature. 2013. Vol. 503. P. 238–241.