

С. А. Язев

О СВОЙСТВАХ НЕСКОЛЬКИХ СУПЕРБОЛИДОВ*

Введение

Как известно, в атмосферу Земли регулярно попадают метеорные тела сравнительно крупных (субметровых и метровых) размеров [14]. Они наблюдаются в виде болидов — ярких метеоров с «хвостами», видимым дроблением на фрагменты в виде «искр», иногда сопровождаемые акустическими эффектами. В отдельных случаях особо мощных болидов (суперболидов) наблюдаются сотрясения из-за действия ударной волны, порождаемой взрывами метеорных тел на больших высотах.

Имеющиеся оценки указывают, что явление суперболида порождается входом в атмосферу тела с характерным размером около первых метров. Физическая природа таких тел может быть различной. Железные метеороиды могут привести к выпадению железных метеоритов (пример — Сихотэ-Алинский метеорит с характерным размером на входе в атмосферу порядка 3—4 м [4; 7; 11]). Такие события относительно редки. Каменные метеороиды, как правило, интенсивно разрушаются под воздействием давления набегающего воздушного потока и дробятся на мелкие фрагменты. При этом эффекты абляции приводят к интенсивной потере распыленного вещества с поверхности падающего метеорного тела, и в атмосферу впрыскиваются тонны вносимого материала. До поверхности Земли в таких случаях долетают лишь отдельные каменные фрагменты.

Ледяные метеороиды (фрагменты кометных ядер), по-видимому, также порождают болиды, хотя прямых подтверждений этому нет [11]. Считается, что Тунгусское явление 1908 г. связано с взрывообразным испарением крупного ледяного метеороида (фрагмента кометного ядра) с характерным размером 30—50 м [4; 11].

В настоящей работе приводятся данные о четырех суперболидах, наблюдавшихся в России в начале XXI в.

Витимский болид 2002 года

Общие сведения. В ночь на 25 сентября 2002 г. (около 16.50 UT 24 сентября 2002 г., местное время около 01.50 ночи) на северо-востоке Иркутской области (Мамско-Чуйский и Бодайбинский районы, бассейн

* Публикуется впервые.

р. Витим) наблюдался яркий болид, сопровождавшийся акустическими эффектами и мощной воздушной волной, вызвавшей сотрясения на больших расстояниях [1—3; 12—20]. Яркое свечение было обнаружено спутниками ВВС США на высоте около 62 км в точке А с географическими координатами $57,91^\circ$ с. ш. и $112,90^\circ$ в. д. Болид прослежен до высоты приблизительно 30 км над точкой В с координатами $58,21^\circ$ с. ш. и $113,46^\circ$ в. д. [27]. Реконструкция траектории падения по этим данным позволила оценить угол ее наклона к горизонту (примерно 34°). Общая длина проекции траектории от точки обнаружения до точки вероятного падения С (пересечения прямой траектории с землей) составила около 90 км. Рассчитанные координаты последней точки — около $114,06^\circ$ в. д., $58,60^\circ$ с. ш.

Согласно спутниковым данным, в видимом диапазоне пик интенсивности излучения болида равнялся $2,4 \cdot 10^{11}$ Ватт/стерад. Общая излученная энергия оценена в $8,6 \cdot 10^{11}$ Дж, что соответствует температуре черного тела 6000 К и эквивалентно взрыву 200 т тротила. Суммарная кинетическая энергия на входе в атмосферу оценена в 2400 т тротила [11].

Болид падал в условиях сплошной низкой облачности над Мамско-Чуйским районом, нижняя кромка облаков — 1100 м, что соответствует высоте господствующих вершин (гольцов). Температура была около нуля по Цельсию, шел мелкий дождь, в горах — снег. Глубина снегового покрова на вершинах не превышала 5—10 см. Спустя несколько дней здесь прошли обильные снегопады, которые, как и предполагалось, законсервировали в слое снега выпавшие частицы из дымно-пылевого следа болида.

По известным параметрам траектории падения рассчитан радиант болида: прямое восхождение $22^{\text{h}}18^{\text{m}}$, склонение $10^\circ 02'$ в созвездии Пегаса [3]. Эти данные могут быть использованы для оценки принадлежности болида, названного автором Витимским, к какому-либо метеорному потоку, хотя приведенные ниже данные о составе вещества позволяют в первую очередь рассматривать предположительно астероидное происхождение метеороида.

Экспедиционные исследования района падения болида. Район падения Витимского болида изучался несколькими экспедициями. Первая (октябрь 2002 г.), организованная Институтом солнечно-земной физики (ИСЗФ) и астрономической обсерваторией ИГУ под руководством С. А. Язева, обследовала местность в районе точки В потери спутниками болида и опросила около 30 очевидцев в поселках в поселках Мама, Луговка, Мусковит, Витимский.

Вторая экспедиция (март — апрель 2003 г.), проведенная Институтом геохимии (ИГ) СО РАН и ИСЗФ СО РАН (начальник экспедиции С. В. Ефремов, научные руководители В. С. Антипин и С. А. Язев), отобрала пробы снега в районе той же точки В в целях поиска частиц, предположительно выпавших из дымно-пылевого следа болида.

Третья экспедиция (июль — август 2003 г., ИГ СО РАН, ИСЗФ СО РАН, астрономическая обсерватория ИГУ и Институт геохимии РАН, начальник экспедиции С. В. Ефремов, научные руководители В. С. Антипин,

Д. Д. Бадюков и С. А. Язев) обследовала участок проекции траектории от точки потери болида до рассчитанной точки вероятного падения (в случае движения болида по прямой вплоть до пересечения с земной поверхностью). Кроме того, район изучался экспедициями УрГУ (июль 2003 г., руководитель В. И. Гроховский, Екатеринбург) и НПО Прикладной механики (июль 2003 и июль 2004 гг., руководитель В. Е. Чеботарев, Красноярск). Результаты экспедиций опубликованы в работах [1—3; 13—20].

В мае 2003 г. в том же районе работала экспедиция общественного объединения «Космопоиск», руководитель В. А. Чернобров. Результаты экспедиции в научных изданиях не представлены.

Результаты выполненного под руководством В. С. Антипина комплексного анализа частиц субмикронного размера, обнаруженных в снеговых пробах второй Витимской экспедицией, приведены в [1—2]. Они позволяют с высокой степенью уверенности предполагать, что феномен Витимского болида явился следствием вхождения в атмосферу каменного метеороида.

Повреждения леса. Всеми тремя экспедициями удалось обнаружить в зоне шириной 5—7 км вдоль трассы полета болида участки и полосы свежесломанного и свежеповаленного леса с характерным масштабом в сотни метров — километры. Датировка сломов и вывалов, по свидетельствам проводников второй и третьей экспедиций, местных охотников А. Скибицкого и В. Андреева, много лет работающих в этом районе, однозначно указывает на осень 2002 г. В некоторых местах доля поврежденных деревьев составляет 10—15 % (участок вблизи конца траектории, правый склон ручья Плохой, координаты центра зоны повреждений $58^{\circ}27,424'$ с. ш., $113^{\circ}56,601'$ в. д.). Зона тянется вдоль ручья не менее чем на 500 м, от ложа ручья до высоты около 200 м (начало зоны кедрового стланика). Обнаружены и сняты на фото- и видеопленку березы, лиственницы, сосны, осины со сломанными вершинами, сломы на высоте 9—15 м. Рядом со сломанными деревьями наблюдались внешне такие же, но совершенно не поврежденные экземпляры. В некоторых случаях отломанные вершины деревьев лежали в 10—15 м от оснований, при этом этот эффект наблюдался и на относительно ровных местах (не ниже по склону от ствола дерева). Обнаружены многие деревья, вывороченные с корнем, включая стволы диаметром 30—40 см у основания. Согласно свидетельствам местных жителей, ранее ничего подобного здесь никогда не наблюдалось. Большинство деревьев лежит вершинами вниз по склону. Судя по всему, мощности внешнего воздействия хватило, чтобы резко качнуть дерево, а падало оно преимущественно вниз по склону. Радиальная структура сломов и вывалов (наружу от проекции трассы полета) не наблюдается или наблюдается с большими оговорками.

Еще одна зона сильных повреждений леса отмечена на ручье Упорный в 300—500 м от места его впадения в реку Большая Северная, а также на ручье Перевальный, впадающем в Упорный (вблизи точки с координатами $58^{\circ}17,701'$ с. ш. и $113^{\circ}34,049'$ в. д.). Здесь осенью 2002 г. появилась большая зона поваленных (вывороченных с корнями) и сломанных берез. С некоторых лиственниц была сбита хвоя.



Рис. 1. Сломы осин и вершин берез. Голец Попутный, левее траектории полета болида, около 6 км к северо-востоку от точки В. Координаты $58^{\circ}12,672'$ и $113^{\circ}23,278'$.

В данном месте обнаружены множественные сломы вершин берез, осин, елей.

Снимок сделан 8 апреля 2003 г.

Вероятнее всего, сломы объясняются «эффектом хлыста»: ударная волна, сопровождаемая идущим вслед слоем пониженного давления, сильно встряхивала деревья, амплитуда резкого колебания оказывалась максимальной вблизи вершин деревьев, и вершины в ряде случаев отламывались.

Альтернативные объяснения (воздействие сильного ветра, сломы под влиянием снеговых шапок на деревьях) выглядят неубедительно и весь набор наблюдаемых повреждений объяснить не могут. Остроконечные ели и лиственницы зимой стояли совсем без снега (что наблюдалось во время первой и второй экспедиций). По данным Гидрометслужбы, сильные ветры осенью 2002 г. в районе не отмечены.

Проблема происхождения механического воздействия вызывает множество вопросов. Очевидно, что амплитуда ударной волны, пришедшая

с высоты 25—30 км, не должна быть существенной, и связь между волной

и множеством поваленных и поврежденных деревьев выглядит на первый взгляд нереальной. С другой стороны, очевидцы указывают на значительное действие волны даже близ пос. Мама, в 50 км от трассы полета по версии спутника (сотрясение подбросило печку, посуда со стола свалилась на пол, школьника отбросило от стенки будки на вершине горы [15—16]). Высокая мощность акустических эффектов описана многими очевидцами, несмотря на то, что они (очевидцы) находились в долине реки, экранированной высокими горами. С точки зрения автора, большая мощность ударной волны может быть объяснена предполагаемой высокой скоростью полета болида и/или сложными динамическими процессами разрушения метеороида. Это означает, что модели ударных волн, формируемых в атмосфере высокоскоростными объектами в процессе их торможения и разрушения, нуждаются в существенной корректировке. Пространственная структура зон повреждения леса позволяет предположить анизотропию и неоднородность ударной волны, возможно, связанную со сложными динамическими процессами разрушения метеороида.

В работе [13] выполнены расчеты, из которых следует, что избыточное давление в ударной волне на расстоянии 30—35 км составляло 1,8—

2,2 кПа, а импульс положительной фазы ударной волны составил 6—7 кПа. При таких параметрах волны наблюдаются повреждения примерно 10—15 % леса, что и наблюдалось на отдельных участках вдоль траектории падения по данным экспедиции лета 2003 г. [3; 16; 18]. В ранней работе [8] показано, что повреждение 5 % леса достигается при избыточном давлении в ударной волне 0,8—1 кПа. Л. Ф. Черногор [13] отметил, что расчеты параметров волны, вызвавшей сотрясение построек и дрожание стекол, выполненные с учетом критериев из [21], также привели к значению кинетической энергии болида порядка 1013 Дж, полученному другими авторами с использованием других методов. Этот результат можно рассматривать как дополнительное указание на правильность основных оценок энергетики болида.



Рис. 2. Сломанные березы. Правый борт ручья
Перевальный. Вблизи точки с координатами
58° 17,701' с. ш. и 113°34,049' в. д.
Снимок сделан 1 августа 2003 г.

К вопросу о радиоактивности Витимского болида. Согласно данным, полученным в Иркутском областном управлении гидрометслужбы, среднегодовое значение уровня радиоактивного фона в Мамско-Чуйском районе (районе падения болида) по данным за 10 лет составляет 13 мкр/ч. По официальному свидетельству и. о. начальника АМСГ Мама Н. А. Сыроквашко, отдельные измерения фона в редких случаях дают значение 18—19 мкр/ч, но не выше, среднемесячные значения варьируют в пределах от 9 до 16 мкр/ч. Начальник АМСГ Мама Г. И. Костина сообщила автору, что в 9 ч утра 25 сентября 2002 г., спустя 7 ч после падения болида, ею был проведен внеплановый замер уровня радиоактивности. Полученное значение составило 30 мкр/ч. Штатные измерения, проведенные, как обычно, в 15 ч, показали, что фон упал вдвое и был близок к обычной норме. С этой точки зрения измеренное утром значение 25 сентября представляет собой аномальную величину. Измерения, проведенные спустя месяц, 23—24 октября первой Витимской экспедицией в районе точки потери болида В сенсорами спутников, дали 15—17 мкр/ч.

Рост уровня радиоактивности в пос. Мама утром 25 сентября 2002 г. может в принципе объясняться причинами, не связанными с феноменом болида (например, использованием в кочегарке угля с повышенным радиоактивным фоном в сочетании с определенным направлением ветра, и тому подобные причины). Если бы не внеплановые утренние измерения, кратковременный скачок радиоактивного фона остался бы незамеченным (ежедневные измерения проводятся раз в сутки в 15 ч местного времени). Тем не менее, представляется важным указать на этот факт и



Рис. 3. Сломанные лиственницы. Вблизи пос. Большой Северный. Снимок сделан 30 июля 2003 г.

ввести его в научный оборот. Основная версия роста уровня фона связана с сотрясением, вызванным ударной волной, которое могло привести к выходу на поверхность земли из трещин порций радона, который сравнительно быстро рассеялся. В то же время анализ найденных во время второй экспедиции весной 2003 г. частиц [1—2] показал отсутствие в их составе радиоактивных веществ, что является доводом в пользу первой гипотезы (выход земного радона).

Коми болид 2009 года

17 октября 2009 г. жители Ижемского района Республики Коми стали свидетелями полета яркого болида. Согласно описанию анонимных очевидцев, опрошенных корреспондентом журнала «Итоги» С. Кривошеевым (псевдоним Д. В. Рябцева [9]), и присланному автору, «вечером 17 октября 2009 года... мы находились на улице в центре села Няшабож. Примерно в 20.35 заметили в небе яркую вспышку света на северо-востоке, потом увидели очень быстро приближающийся ослепительный огненный шар желтого цвета, который оставлял за собой пятнистый след зеленоватого оттенка. Шар искрил, как бенгальский огонь. Летел он с северо-востока на запад. Секунд через пять он исчез из поля зрения, небо снова стало черным и примерно через минуту мы услышали очень сильный грохот (взрыв). Потом все стихло».

Еще одно описание явления, принадлежит очевидцу М. Каневу [9—10]: «В тот вечер мы с друзьями рыбачили на реке Печора. Около 20.35 было уже темно, висела низкая облачность (по моим ощущениям, метров 200—300). Вдруг облака засветились, словно кто-то зажег яркую лампочку. Мы увидели, что из-за облаков, словно на посадку, несется огненный шар. Складывалось впечатление, что он вот-вот рухнет на наши головы. Мы даже пригнулись. Шар был ярко-красного цвета с оранжевым оттенком. За ним, словно хвост, тянулся шлейф зелено-оранжевого цвета, который искрил. Пролетев над нами, объект скрылся за верхушками сосен. Затем тайгу ослепил ярко-белый свет, и секунд через пятнадцать мы услышали взрыв. По реке пошла волна, лодку закачало. Взрывов было несколько — первый самый громкий, остальные, — как будто кто-то сильно бросил пустые бочки на землю. Затем все стихло и опять стало темно».

Экспедиция журнала «Итоги» в район падения отметила что «верхушки деревьев кто-то срезал. Причем на земле нет верхушек, они висят на деревьях, словно их кто-то подломил».

«Свидетелями странного свечения, а затем и взрыва, стали десятки местных жителей, в том числе и сотрудники администрации поселка Ижма. Все говорят примерно одно и то же. Шли, гуляли, погода была облачной. Вдруг небо осветила яркая белая вспышка, причем она была настолько яркой, что у многих заболели глаза. После того как вспышка погасла, минуты через три-четыре прогремел мощный взрыв. Сила его была такой, что земля затряслась. Сам поселок находится в ста километрах от предполагаемого эпицентра взрыва. Там пролет самого тела никто не видел, и ощущали, видимо, уже последствия его падения.

Делали запрос на космодром Плесецк, но нам сообщили, что запусков в это время не было. Метеостанция в Сыктывкаре не зафиксировала никаких сотрясений, сейсмика была в норме. Радиационный фон тоже в норме, от 6 до 12 мкР/ч» [10].

Сравнивая имеющиеся у нас (впрочем, довольно скудные) данные о Коми болиде с данными о Витимском болиде, отметим, что, судя по свидетельствам очевидцев, свечение в Коми было слабее, чем в случае Витимского болида. Не упоминаются и специфические звуки, о которых сообщали все очевидцы Витимского болида: шелест, шуршание, и только потом мощный удар и сотрясение. Это значит, что болид Коми не был электрофонным: звуки, вызванные мощным переменным электромагнитным полем разрушающегося метеороида, слышны не были. Прочие же описания двух болидов очень близки: яркий шар с хвостом, от которого сыпались искры, смена цвета свечения — от ослепительно-белого до красного и синего.

Отметим, что в распоряжении участников экспедиции к месту наблюдения Коми болида есть снимки, где видны свежесломанные верхушки деревьев. Такое же явление зафиксировано вдоль траектории падения Витимского болида во время экспедиций в 2002—2003 гг. [1—3; 15—20]. По мнению автора, это следствие воздействия ударной волны суперболида. К сожалению, отсутствуют данные о процентном соотношении поврежденных и неповрежденных деревьев в зона падения Коми болида. Исходя из предположения, что эта доля была в пределах 5 %, можно говорить об избыточном давлении ударной волны в районе обследования до 0,8 кПа [8; 13].

Осинский болид 2011 года

1 марта 2011 г. в Осинском районе Иркутской области (райцентр Оса находится в 170 км к северо-востоку от Иркутска) приблизительно в 18.30 наблюдалось явление, которое можно интерпретировать как очередной суперболид. По данным пресс-службы Иркутского регионального управления МЧС, «свечение неизвестного летающего объекта с последующим хлопком наблюдало на небе жители ряда населенных пунктов Осинского района — Обуса, Барахал, Хайга, Кутанка, Северный».

Корреспонденты газеты «Комсомольская правда» О. Буева и Л. Колодежная опросили жителей пос. Онгой Осинского района [23].

П. Хаташкеев: «Вдруг комнату осветило, как во время молнии, через секунду раздался хлопок — такой сильный, что мебель задрезжала. Первая мысль — землетрясение!».

А. Оленова: «К окну подошла, а там ка-а-ак пыхнет! Я чуть не олепла! Секунды две вспышка была, как шар светящийся. Дом задрожал...»

Спустя 2 ч после события автор опросил по телефону жителя деревни Обуса П. Касьянова. Тот сообщил следующее:

«Я шел по улице. Небо было еще светлое, начинало темнеть, было облачно. Заметил яркую вспышку, как от фотоаппарата, но очень сильную. Вспышка осветила все вокруг. Нельзя было сказать, где был источник света — осветило все равномерно со всех сторон. Поднял голову. Увидел просвет в облаках, там была видна темная полоса — “как от самолета”, примерно с севера на юг, и “белое пятно” на темной полосе. Судя по внешнему виду, полоса сформировалась недавно (или только что), была компактная, ветром ее еще не разнесло. Я постоял и пошел дальше. Примерно через минуту после вспышки раздался сильный грохот, сопровождавшийся “вибрацией”».

Главное свидетельство о болиде — фотография, которую успел сделать житель района Алексей Сергеев на камеру мобильного телефона. Снимок был передан автору редакцией газеты «Окружная правда».

Студент географического факультета ИГУ М. В. Лопатин опросил очевидцев в пос. Приморском Осинского района. Очевидцы описали два ярких белых пятна, возникших в небе после явления. Лопатин, находясь на месте наблюдения, указанном очевидцем, определил по их показаниям азимут положения светлых пятен на небе при наблюдении из пос. Приморского (85° — 90°) на высоте 25° — 30° над горизонтом. Видеозапись светлых пятен (по-видимому, этих же) продолжительностью около минуты была получена неизвестным очевидцем, находившимся в тайге, на камеру мобильного телефона. На записи (хранящейся в архивах обсерватории ИГУ) видно, что светлые размытые пятна заметно смещаются на изображении вправо, видимо, под действием ветра.

Происхождение пятен неизвестно. Можно предположить, что это были облака типа инверсионного следа — конденсат на частицах из дымно-пылевого следа болида.

Вспышка и последующий удар с разной задержкой (по субъективным оценкам очевидцев, от секунд до нескольких минут) отмечены на территории в несколько десятков километров. Судя по описаниям, наблюдавшиеся явления в Осинском районе можно связать с падением суперболида класса Витимского (но, видимо, несколько меньшей мощности).

Челябинский болид 2013 года

Знаковым событием, причем не только для россиян, стал феномен 15 февраля 2013 г., наблюдавшийся в Челябинской области. К моменту подготовки данной статьи вышло множество публикаций в СМИ, посвященных указанному явлению, в то время, как научных статей в профес-

сиональных изданиях пока еще нет. С учетом этих обстоятельств, приведем краткий обзор данных по челябинскому болиду.

В 9.20 по местному времени на южном Урале наблюдался яркий болид (рис. 6). В виде огненного шара с ярким хвостом, он двигался с юго-востока на северо-запад под небольшим углом (около 16°) к горизонту, оставляя мощный белый дымно-пылевой след на голубом утреннем небе. Начиная с некоторого момента, след разделился на два.

Свечение болида усиливалось, переходя в ослепительное сияние, сопоставимое с яркостью Солнца, завершившееся яркой вспышкой [6].

Болид наблюдался на огромной территории, включая Тюменскую, Челябинскую и Свердловскую области, Северный Казахстан и Башкортостан. Длина проекции траектории падения превышает 300 км. Сам факт наблюдения издали, особенно в начале траектории на фоне светлого неба, свидетельствует о том, что свечение болида началось на большой высоте — 70—90 км.

Начальная скорость метеороида на входе в атмосферу, по оценке чешских исследователей И. Боровички, П. Спурни и Л. Хрбени, составила 17,5 км/с [22]. Сходную скорость (около 18 км/с) указывает и NASA.

По данным Астрономического института Академии наук Чехии, небесное тело вошло в атмосферу на высоте 91 км над оз. Большие Донки на юге Курганской области (координаты, предоставленные чешскими исследователями, — 54,508 E, 64,266 N). Спустя 9 с на высоте 41 км над с. Белоусово около оз. Большой Шантропай Еткульского района Челябинской области (54,788 N, 61,913 E) оно начало разрушаться — согласно расчетам, давление набегающего потока воздуха к этому моменту достигло 4 мПа [15] (по предварительным оценкам А. В. Багрова — 15 мПа) [5].

Самая яркая вспышка произошла, по предварительной оценке упомянутых чешских авторов, двумя секундами позже на высоте 32 км приблизительно над центром треугольника, который образуют город Коркино и поселки Еманжелинка и Еткуль ($54,836^\circ$ N, $61,455^\circ$ E). Эта точка находится примерно в 40 километрах к юго-юго-востоку от центра Челябинска. Позднее другими авторами были выполнены уточненные оценки высоты основной вспышки болида — 22—23 км, которые впоследствии стали общепринятыми [5; 26].

Событие было исключительно мощным. Используя выполненные сетью наземных станций измерения порожденного болидом инфразвука, специалисты NASA опубликовали по свежим следам результаты модельных расчетов. По данным агентства Associated Press, общее количество выделившейся энергии, возможно, достигло 300—500 тыс. т (до полумегатонны!) в тротиловом эквиваленте [24], что соответствует величине $12\text{--}20 \cdot 10^{14}$ Дж. Начальная масса метеороида при этом оценена в 7—12 тыс. т, его габариты — до 17 м [25]. В случае если метеороид представлял собой не каменное тело, а ледяную матрицу с хондритовыми вкраплениями, размеры тела могли достигать 22 м. В пользу этой версии, согласно А. В. Багрову [5], может говорить возможное несоот-

ветствие давления атмосферы на тело метеороида в момент его разрушения и прочности каменных хондритов: даже завышенная оценка давления в 15 Мпа в момент вспышки в несколько раз ниже прочности хондритов, оцененной по лабораторным измерениям.

По оценке О. П. Поповой, эффективность высвета (потерь кинетической энергии падающего тела на электромагнитное излучение) могло достигать 13—18 % (см. также [7]). Свидетельства очевидцев в Челябинске, предоставленные автору, свидетельствуют о том, что кожей ощущалось тепло излучения во время пролета болида, а яркость превышала яркость Солнца.

Механизм разрушения небесных тел в атмосфере сводится в общих чертах к следующему. Из-за гигантского давления набегающего потока и высоких температур каменное тело уже на больших высотах начинает дробиться и разрушаться. Набегающий поток уносит отделяющиеся частицы (процесс абляции), формируя дымно-пылевой след болида. На определенной высоте (при определенной плотности воздуха) термонапряжения начинают превышать предел прочности летящих осколков. Происходит так называемый концевой тепловой взрыв метеороида. В итоге осколки дробятся до размеров щебня и даже крупного песка, существенная их часть взрывообразно испаряется в раскаленном газовом (плазменном) облаке, окружающем рой летящих фрагментов. Обычно это случается на высотах около 20—30 км (наиболее яркая вспышка наблюдалась южнее Челябинска на высоте 23 км).

Этот процесс является очень сложным и не одномоментным. Часть фрагментов приобретает во время взрыва дополнительные боковые компоненты скорости, отдельным фрагментам, отделившимся ранее, удается эффективно погасить скорость из-за трения о воздух и не развалиться в пыль. В итоге, помимо мельчайших частичек с размерами пылинок и песчинок, в рое летящих осколков могут оставаться мелкие камешки и фрагменты покрупнее, разлетающиеся веером. Наиболее крупные осколки по инерции улетают вдоль траектории дальше всего, «мелкие фрагменты» быстро теряют скорость и выпадают раньше [4; 7; 11].

Сравнительно крупный фрагмент упал в озеро Чебаркуль, пробив лед. Согласно частному сообщению В. И. Гроховского, на дне озера по результатам магнитной съемки обнаружены аномалии, а съемки с помощью георадара показали наличие трехметровой воронки в илистом дне несколько в стороне от полыньи. Большой фрагмент метеорита весом более 600 кг был поднят 16 октября 2013 г. из оз. Чебаркуль экспедицией «Язь» (<http://expedition-yaz.livejournal.com/>).

Отдельные мелкие осколки каменного метеорита (обыкновенного хондрита типа LL5/S4-WO, как показал анализ, выполненный сотрудниками Института геохимии РАН в Москве) массой от долей грамма до 1,8 кг удалось обнаружить в снегу вблизи траектории падения [25]. Автору данной работы были переданы несколько фрагментов Челябинского космического тела, найденные жителями Челябинска В. В. Молодзиевским и М. Л. Кармановым. Эти фрагменты переданы для анализа в Институт геохимии СО РАН в Иркутске.

Полет в атмосфере крупного тела с космической скоростью порождает мощную ударную волну. Волна пришла с большой высоты спустя несколько минут после вспышки. В результате Челябинску был нанесен ущерб примерно на 1 млрд руб. Ударная волна выбила стекла общей площадью 200 тыс. м², повредила рамы и легкие конструкции. Всего были повреждены около 7300 зданий. В одном месте рухнула кирпичная стена. Осколками разбитых стекол были ранены (некоторые тяжело) около 1500 чел. То, что обошлось без жертв, можно рассматривать, как фантастическое везение: все могло закончиться гораздо хуже.

Полет в атмосфере крупного тела с космической скоростью порождает мощную ударную волну. Волна пришла с большой высоты спустя несколько минут после вспышки. В результате Челябинску был нанесен ущерб примерно на миллиард рублей. Ударная волна выбила стекла общей площадью 200 тыс. м², повредила рамы и легкие конструкции. Всего были повреждены около 7300 зданий. В одном месте рухнула кирпичная стена. Осколками разбитых стекол были ранены (некоторые тяжело) около 1500 человек. То, что обошлось без жертв, можно рассматривать, как фантастическое везение: все могло закончиться гораздо хуже.

Действие ударной волны привело в городе к ряду неожиданных эффектов. Заместитель директора, учитель физики челябинского лицея № 31 М. Л. Карманов рассказал автору, что в спортивном зале лицея из вентиляционных отверстий ударной волной было выброшено в помещение зала большое количество (много ведер) пыли и грязи, видимо, скопившихся в вентиляционных ходах.

Жительница Челябинска, автор «Живого журнала» (adgolow@livejournal.com), сообщила автору, что после прихода ударной волны в воздухе ощущался запах серы, напоминавший запах новогодних фейерверков. Это независимо подтвердил автору житель Челябинска И. Целовальников, написавший: «Я точно помню этот запах; серный запах, как в металлургии, когда плавится металл».

Впервые в современной истории человечества событие было зафиксировано с максимальной подробностью при помощи видеорегистраторов на автомобилях одновременно с многих точек наблюдения, разнесенных в пространстве. Это позволяет детально восстановить процессы, происходившие во время падения, сравнивая их с теоретическими прогнозами. Исследования обстоятельств падения челябинского метеороида ведутся целым рядом научных коллективов и будут продолжены.

Заключение

Феномен суперболидов вызывал и продолжает вызывать большой интерес исследователей. Судя по имеющимся данным, оценка начальной кинетической энергии порядка 10^{13} Дж, или 2.4 кт ТНТ, как у Витимского болида, отмечалась только в десяти случаях для периода с 1990 по 2005 гг. [7]. Другими словами, явление суперболида наблюдается раз в 1—2 года. Однако, согласно более современным данным О. П. Поповой,

представленным в ее докладе на семинаре 21 марта в ГАИШ МГУ, посвященном челябинскому болиду, суперболиды, порождающие свечение в атмосфере, соответствующее блеску ярче (-17) звездной величины с энерговыделением в пределах от 0,01—4 кт ТНТ, наблюдаются в количестве порядка 20—30 событий в год. Несомненно, события, наблюдающиеся вблизи густонаселенных городов, происходят гораздо реже. В частности, челябинский болид можно расценивать как уникальное событие в новейшей истории.

В работах [1—3; 12—20] приведены результаты исследований обстоятельств падения Витимского болида и вызванных этим падением следствий. Ряд сторон феномена остается неясным. К их числу относится и вопрос о механизме возникновения массивированных повреждений леса вдоль траектории падения болида. Вызывает интерес предполагаемая связь между падением болида и непродолжительным ростом радиоактивного фона в районе пос. Мама. Могут быть рассмотрены две основные версии — инъекция радиоактивного вещества, содержащегося в метеороиде, и выход геогенного радона под влиянием сотрясения почвы в результате падения. Автор считает вторую гипотезу предпочтительной.

Оценка суммарной массы метеороида, породившего Витимский болид, при заданном энерговыделении около 10^{14} Дж [7] для скорости входа 20 км/с дает около 50 т, для 15 км/с — 90 т. Для каменного тела это дает характерный размер метеороида порядка первых метров.

В отличие от Витимского болида, падение которого регистрировалось американскими спутниками, данных о траектории и обстоятельствах Коми и Осинского болидов существенно меньше. Поэтому шансы на случайное обнаружение выпавших метеоритов можно считать невысокими. По-видимому, масса и размеры двух указанных метеороидов были меньше, чем в случае с Витимским.

Что касается параметров челябинского космического тела, то предварительные (но ставшие общепринятыми) данные указывают на его скорость 18 км/с при массе порядка 10000 т и габаритах 17—20 м, а также суммарном энерговыделении в пределах 300–500 кт ТНТ. Это существенно больше, чем в случае с Витимским болидом. Это редкое явление, принесшее ущерб стоимостью порядка 1 млрд руб. и многочисленные (до 1500 пострадавших) травмы, является грозным предупреждением о том, что такие события, включая более мощные, возможны.

По состоянию на начало 2014 г. удалось лишь дважды за несколько десятков часов до столкновения с Землей обнаружить приближающиеся небесные тела. Удалось спрогнозировать его вход метеороида 2008 TC₃ размером около 3 м в атмосферу 7 октября 2008 г. над пустынной областью на севере Судана. Болид был зарегистрирован на высоте 65,4 км. На высоте около 37 км объект взорвался. Выделившаяся энергия (в модели абсолютно черного тела с температурой 6000 °С) оценена в $4 \cdot 10^{11}$ Дж, что эквивалентно взрыву около 100 т тротила. Спустя месяц в пустыне были найдены сотни осколков метеорита общей массой около 5 кг.

Второй подобный случай относится к первым дням 2014 г. Утром 1 января телескоп с шестидесятидюймовым зеркалом обсерватории Mount

Lemmon (штат Аризона, США) открыл небольшой (2—3 м) астероид 2014AA. Согласно расчетам Центра Малых Планет в Кембридже и Лаборатории Реактивного Движения НАСА, уже через несколько часов астероид 2014AA должен был столкнуться с Землей. С наибольшей вероятностью падение должно было произойти вблизи западного побережья Африки около 6 часов утра 2 января по московскому времени. В настоящее время анализируются несколько слабых инфразвуковых сигналов, зафиксированных регистрирующими станциями в этом регионе. Шансов найти осколки упавшего метеорита практически нет: скорее всего, фрагменты ушли на дно Атлантического океана.

Возможности наблюдательной астрономии постепенно нарастают. В 2011 г. было открыто 898 ранее не известных астероидов, сближающихся с Землей, в 2012 г. — 994 подобных объекта. Число обнаруженных в течение 2013 г. подобных астероидов впервые превысило тысячу (1037 объектов).

Таким образом, в начале второго десятилетия XXI в. впервые начинают отрабатываться технологии, способные заблаговременно (правда, пока с упреждением порядка нескольких суток) фиксировать приближающиеся малоразмерные космические объекты, способные в случае столкновений с Землей порождать явления типа суперболидов. К сожалению, существующие средства наблюдения не позволяют пока обнаруживать объекты, приближающиеся со стороны Солнца (на дневном небе), подобно челябинскому метеороиду.

Как указано выше, особенности проявлений подобных феноменов и их воздействие на природную среду остаются до конца не изученными. Проблема их исследования является актуальной, в частности, в контексте обеспечения безопасности инфраструктуры цивилизации.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, тема НИР 091-08-105 «Исследование быстропеременных процессов на Солнце, звездах и в верхней атмосфере Земли с помощью комплексных астрономических наблюдений».

Список литературы

1. Антипин, В. С. Природные явления и вещество абляционного следа Витимского метеороида (25 сентября 2002 г.) / В. С. Антипин, С. А. Язев, М. И. Кузьмин и др. // Докл. РАН. — 2004. — Т. 398. — № 4. — С. 482—486.
2. Антипин, В. С. Витимский метеорит (25 сентября 2002 года) — результаты комплексных исследований / В. С. Антипин, С. А. Язев, А. Б. Перепелов и др. // Геология и геофизика. — 2005. — Т. 46. — № 10. — С. 1050—1064.
3. Антипин, В. С. Комплексные исследования Витимского болида / В. С. Антипин, А. Н. Арсентьев, Д. В. Семенов, С. А. Язев // Окозземная астрономия — 2007 : материалы Междунар. конф. пос. Терскол. 3—7 сент. 2007 г., — Нальчик, 2008. — С. 281—288.
4. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / под ред. Б. М. Шустова, Л. В. Рыхловой. — М. : Физматлит, 2010. — 384 с.
5. Багров, А. В. Оценка происхождения и состава матрицы Челябинского болида / А. В. Багров, В. А. Леонов, Н. В. Попеленская (в печати.)

6. Гомзикова, С. Удар из космоса [Электронный ресурс] / С. Гомзикова, В. Словецкий, С. Ищенко, А. Иванов // Свободная пресса. — 2013. — 17 февр. — URL: <http://svpressa.ru/accidents/article/64416>.
7. Катастрофические воздействия космических тел / под ред. В. В. Адушкина и И. В. Немчинова ; Ин-т динамики геосфер РАН. — М. : Академкнига, 2005. — С. 110—113.
8. Коробейников, В. П. Комплексное моделирование полета и взрыва в атмосфере метеорного тела / В. П. Коробейников, П. И. Чушкин, Л. В. Шуршалов // Астрон. вестн. — 1991. — Т. 25. — № 3. — С. 327—343.
9. Кривошеев, С. Эх, залетные! / С. Кривошеев, А. Замахин // Итоги. — 2009. — № 48 (702). — 23 нояб. — С. 68—70.
10. Рябцев, Д. Письмо С. А. Язеву / Д. Рябцев (частное сообщение). — 2009. — 17 нояб.
11. Угроза с неба: рок или случайность? / под ред. А. А. Боярчука. — М. : Космоинформ, 1999. — 220 с.
12. Чеботарев, В. Е. Новая космическая загадка Сибири / В. Е. Чеботарев, С. П. Котельников, А. П. Андреев // Земля и Вселенная. — 2004. — № 5. — С. 67—71.
13. Черногор, Л. Ф. Колебания геомагнитного поля, вызванные пролетом Витимского болида 24 сентября 2002 г. / Л. Ф. Черногор // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2011. — Т. 51. — № 1. — С. 119—132.
14. Язев, С. А. Роль космогенных факторов в формировании физико-химических параметров поверхности планет / С. А. Язев // Актуальные проблемы деятельности академических естественно-научных музеев : материалы Междунар. науч. конф. ; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Иркут. науч. центр., Байкал. музей. — Новосибирск : Гео, 2010. — С. 199—204.
15. Язев, С. А. Витимский болид: обстоятельства падения и результаты исследования / С. А. Язев, А. В. Иванов, В. С. Антипин и т. д. // Байкальская международная молодежная научная школа по фундаментальной физике : тр. 6-й сессии молодых ученых «Волновые процессы в проблеме космической погоды». — Иркутск : Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2003. — С. 40—46.
16. Язев, С. А. По следам Витимского болида / С. А. Язев, В. С. Антипин // Земля и Вселенная. — 2004. — № 5. — С. 59—66.
17. Язев, С. А. Исследования Витимского болида / С. А. Язев, В. С. Антипин, М. А. Митичкин, С. В. Ефремов, А. В. Иванов, Д. В. // Тр. Гос. астроном. ин-та им. П. К. Штернберга. — М., 2004. — Т. 75. — С. 102.
18. Язев, С. А. Витимский болид: итоги исследований и оставшиеся проблемы / С. А. Язев, В. С. Антипин, А. М. Антипин. // Избранные проблемы астрономии : материалы науч.-практ. конф. «Небо и Земля». г. Иркутск, 21—23 нояб. 2006 г. — Иркутск : Иркут. гос. ун-т, 2006. — С. 177—183.
19. Язев, С. А. Исследование обстоятельств падения Витимского болида 2002 года / С. А. Язев, В. С. Антипин // 100 лет Тунгусскому феномену: прошлое, настоящее, будущее : тез. докл. междунар. конф. — М. : РАН, 2008. — С. 158.
20. Antipin, V. S. Multi-purpose expedition research of the Vitim meteoroid fallen in September 2002 in Irkutsk region, Siberia / V. S. Antipin, S. A. Yazev, A. V. Perepelov, S. V. Efremov, M. A. Mitichkin, A. V. Ivanov // Multi-purpose expedition research of the Vitim meteoroid fallen in September 2002 in Irkutsk region, Siberia. — Meteoroids-2004, Conference in Ontario, Canada, 16—21 August, 2004.
21. The effects of nuclear weapons / eds.: S. Glasstone, P. J. Dolan. — 3rd ed. // US Department of Defense, US Department of Energy. — 1977

22. Берсенева А. Полтонны болида в озере [Электронный ресурс] // Газета.ру. URL: <http://m.gazeta.ru/social/2013/02/25/4980553.shtml>

23. Буюва, О. Новый Тунгусский метеорит: в небе над тайгой взорвался НЛО [Электронный ресурс] / О. Буюва, Л. Колодежная. URL: <http://www.kp.ru/daily/25646/810013>

24. РИА Новости, 17.02.2013 [Электронный ресурс]. URL: <http://news.ru.msn.com/science-and-technology/article.aspx?sr-documentid=253542504>.

25. Челябинский метеорит оказался уникальным. 28.02.2013 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mk.ru/science/space/news/2013/02/28/819818-chelyabinskiy-meteorit-okazalsya-unikalnyim.html>

26. NBC News, 02.03.2013 [Электронный ресурс]. URL: <http://news.ca.msn.com/top-stories/meteor-lurked-for-thousands-of-years-before-blasting-Russia>

27. U. S. Satellites See Russian Impact. [Электронный ресурс]. URL: http://www.nearearthobjects.co.uk/news_display.cfm&code=news_intro&itemID=127